



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS: ADIÇÃO DE CAL E CINZA VOLANTE A
UM SOLO ARGILOSO DE BOM RETIRO DO SUL**

Carolina Pereira dos Santos

Lajeado, dezembro de 2018

Carolina Pereira dos Santos

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS: ADIÇÃO DE CAL E CINZA VOLANTE A UM SOLO ARGILOSO DE BOM RETIRO DO SUL

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Emanuele
Amanda Gauer

Lajeado, dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Ana e Nilo, por todo apoio e auxílio ao longo do curso. Obrigado por todo amor e carinho, por sofrerem junto comigo a cada passo desta importante etapa da minha, por seus exemplos profissional e pessoal e por sempre me incentivarem a estudar e seguir meus sonhos, vocês são maravilhosos.

Agradeço também a professora Dra. Emanuele Amanda Gauer, minha orientadora, por toda paciência, auxílio e disponibilidade ao longo deste ano. Por todos conhecimentos compartilhados, com certeza, seus conselhos foram essenciais para a conclusão desse trabalho.

E, ao pessoal do LATEC, Viane, Marcelo, Guilherme e Laura pela ajuda na realização dos ensaios durante os meses de desenvolvimento do trabalho e pelos momentos divertidos que passamos juntos.

A empresa Conpasul Construção e Serviços, pela disponibilização da cinza volante e pela receptividade em ajudar.

Muito obrigado a minha família, amigos e a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram e apoiaram ao longo destes anos.

RESUMO

Apesar de o solo ser um dos principais materiais utilizados em obras de engenharia civil devido ao seu baixo custo e disponibilidade, constantemente, nas camadas superiores do solo, são encontrados materiais de baixa resistência e alta deformabilidade. Uma alternativa relativamente barata é a estabilização com cales e cinza volante. Assim, o objetivo principal desta monografia é analisar a potencialidade de usar cales ou misturas de cal e cinza volante para estabilizar um solo argiloso, com baixa resistência, de Bom Retiro do Sul. Para isso foram realizados ensaios de compressão simples e medidas de sucção matricial. A determinação dos teores de cal foi realizada pelo método de pH de Eades e Grim assim, com base nos resultados obtidos, foram definidos os teores de 5, 7, 9 e 11%. Em virtude de não haver métodos de determinação para a porcentagem de cinza volante a ser adicionada ao solo, as porcentagens de cinza foram definidas em função dos teores de cal, que de acordo com pesquisas é cerca de 50% do teor da cal, assim foram adotados os teores de 0, 4 e 6%. Ainda, a umidade ensaiada foi de 27%, umidade ótima encontrada pelo ensaio de compactação, e as massas específicas utilizadas foram: 1,529 g/cm³, massa específica aparente seca máxima, obtida pelo ensaio de compactação realizado com o solo puro a energia normal, e 1,453 g/cm³, 95% da máxima. Todos os corpos de prova moldados foram curados por 28 dias. No que diz respeito a influência do teor de cal, verificou-se que inclusive pequenas adições de cal tem efeito sobre a resistência à compressão simples, gerando acréscimos de mais de 200%, o que demonstra a eficiência do aditivo para o solo de Bom Retiro do Sul. A cinza volante também ocasionou melhorias na resistência do solo com a sua associação, adicionando-se 4% de cinza houve aumentos de cerca de 750% na resistência. Esses resultados demonstram que o solo estudado manifesta boa interação com a cal e que essa, pode ser ampliada com a adição de cinza volante afim de obter-se resistências mais elevadas. Além disso, com o aumento do teor volumétrico de cal e cinza volante notou-se redução do número de vazios e, conseqüentemente, da porosidade, o que ocasionou um aumento exponencial na resistência. Decréscimos de, aproximadamente, 4% na porosidade geraram aumentos de mais de 50% na resistência.

Palavras-chave: Estabilização de solos; Estabilização química; Solo-cinza-cal; Solo argiloso.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estabilização em colunas.....	24
Figura 2 – Estabilização em massa e em colunas.....	24
Figura 3 – Processo de floculação.....	27
Figura 4 – Variação da resistência a compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras.....	29
Figura 5 – Relação entre o fator de vazios e a resistência a compressão simples...	30
Figura 6 – Relação entre a porosidade do solo pelo teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples.....	31
Figura 7 – Resultados de resistência a diferentes tempos de mistura.....	34
Figura 8 – Curvas de Compactação de Solo Residual de Arenito Botucatu.....	35
Figura 9 – Visão aérea do local de extração do solo.....	37
Figura 10 – Solo utilizado para o estudo: jazida de onde o solo foi extraído (a) e o solo disposto em uma bandeja (b).....	38
Figura 11 – Ensaio de massa específica do solo.....	39
Figura 12 – Curva Granulométrica.....	40
Figura 13 – Realização do ensaio de liquidez: Solo moldado à concha do aparelho	

de Casagrande (a) e ranhura realizada na pasta (b).....	41
Figura 14 – Gráfico Limite de Liquidez.....	42
Figura 15 – Ensaio de Limite de Plasticidade.....	43
Figura 16 – Compactação de uma amostra.....	46
Figura 17 – Gráfico de compactação.....	47
Figura 18 – Ensaio de massa específica da cal.....	48
Figura 19 – Amostras ensaiadas.....	50
Figura 20 – Béquer com os materiais homogeneizados.....	50
Figura 21 – Gráfico de pH pela porcentagem de cal.....	51
Figura 22 – Combinação dos Corpos de Prova.....	53
Figura 23 – Materiais pesados.....	54
Figura 24 – Aferição dos Corpos de Prova.....	55
Figura 25 – Corpos de Prova acondicionados para a cura.....	55
Figura 26 – Prensa de compressão simples.....	56
Figura 27 – Ensaio Papel Filtro: pedaços de filtro posicionados na amostra (a) e conjunto (amostra + papel filtro) embalado por plástico de PVC (b).....	57
Figura 28 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras com 0% de Cinza.....	60
Figura 29 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras com 4% de Cinza.....	61
Figura 30 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras com 6% de Cinza.....	61
Figura 31 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras moldadas a massa específica de 1,529 g/cm ³	62

Figura 32 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras moldadas a massa específica de 1,453 g/cm ³	63
Figura 33 – Gráfico do efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência a compressão simples.....	65
Figura 34 – Gráfico da influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 0% de CV.....	66
Figura 35 – Gráfico da influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 4% de CV.....	67
Figura 36 – Gráfico da influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 6% de CV.....	67
Figura 37 – Gráfico da influência da sucção nos valores de resistência a compressão simples para os corpos de prova ensaiados.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resposta dos principais componentes de solos a estabilização.....	20
Tabela 2 – Valores do ensaio de Limite de Plasticidade.....	43
Tabela 3 – Classificação dos solos.....	44
Tabela 4 – Variação da resistência entre os CPs com solo puro e os com adição de 5% de Ca.....	64
Tabela 5 – Variação da resistência entre os CPs com solo puro e os com adição de 11% de Ca.....	64

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

Ca: Cal

C_{av}: Teor Volumétrico de Cal

CP: Corpo de Prova

CV: Cinza Volante

IP: Índice de Plasticidade

LL: Limite de Liquidez

LP: Limite de Plasticidade

NLA: National Lime Association

η: Porosidade

pH: Potencial Hidrogênionico

ρ_d: Massa Específica Aparente Seca

$\rho_{dm\acute{a}x}$: Massa Especifica Aparente Seca Máxima

Q_u : Resistência  Compressão Simples

RCS: Resistência  Compressão Simples

Y_d : Peso Especifico Aparente Seco

$\omega_{\acute{o}t}$: Teor de Umidade tima

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.1 Objetivos Específicos.....	15
1.2 Hipótese.....	15
1.3 Delimitação.....	16
1.4 Estrutura do trabalho.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Estabilização de solos.....	18
2.2 Métodos de estabilização.....	19
2.2.1 Estabilização mecânica.....	21
2.2.2 Estabilização física.....	22
2.2.3 Estabilização química.....	23
2.3 Estabilização com cal.....	25
2.3.1 Reações solo-cal.....	26
2.3.2 Alterações nas propriedades dos solos com adição de cal.....	27
2.3.3 Comportamento das misturas solo-cal.....	28
2.3.4 Método de dosagem solo-cal.....	32
2.4 Mistura Cal-Cinza Volante.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Caracterização dos materiais.....	36
3.1.1 Solo.....	36

3.1.1.1 Massa especifica real dos grãos.....	38
3.1.1.2 Ensaio de granulometria.....	39
3.1.1.3 Limites de Atterberg.....	40
3.1.1.4 Classificação do solo.....	44
3.1.1.5 Ensaio de compactação.....	45
3.1.2 Cal.....	47
3.1.2.1 Massa especifica real dos grãos.....	48
3.1.3 Cinza Volante.....	48
3.1.3.1 Massa especifica real dos grãos.....	49
3.1.4 Água.....	49
3.2 Dosagem de cal.....	49
3.3 Programa Experimental.....	52
3.3.1 Moldagem e ensaio de resistência à compressão simples.....	53
3.3.2 Medidas de sucção.....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Resistencia à compressão simples.....	59
4.1.1 Efeito do teor de cal e da porosidade.....	65
4.2 Medidas de Sucção Matricial.....	68
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
5.1 Conclusões.....	70
5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
APÊNDICES	79
APÊNDICE A – Resistência a compressão simples dos CPs ensaiados (Amostras moldadas a massa de 1,529 g/cm ³)	80
APÊNDICE B – Resistência a compressão simples dos CPs ensaiados (Amostras moldadas a massa de 1,453 g/cm ³)	81
APÊNDICE C – Dados gerais dos CPS ensaiados a compressão simples e analisados quanto a sucção (Amostras moldadas a massa de 1,529 g/cm ³)....	82
APÊNDICE D – Dados gerais dos CPS ensaiados a compressão simples e analisados quanto a sucção (Amostras moldadas a massa de 1,453 g/cm ³)....	83

1 INTRODUÇÃO

Rigolon (1998) e Fleury (2002) afirmam que investimentos em infraestrutura urbana, principalmente na área de transportes, impulsionam o crescimento econômico além de melhorar a qualidade de vida da população. Fleury (2002) alega ainda que cerca de 60% das despesas das empresas provém de gastos com o transporte. Assim sendo, pode-se dizer que os meios de transporte são indispensáveis para o funcionamento das cidades e para o desenvolvimento econômico.

A influência do transporte rodoviário na economia é possível de se observar pelo anuário estatístico da Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 2002) que aponta que cerca de 60% do transporte de cargas no Brasil é realizado pelo modal rodoviário, sendo que quando analisado o transporte de passageiros a porcentagem de usuários da malha rodoviária ultrapassa os 95%. De acordo com dados da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2018) o modal rodoviário possui cerca de 1.735.411 km de malha, sendo que desta 1.364.511 km – 78,63%, são de vias não pavimentadas.

Segundo Corrêa (2008) são recomendados solos granulares para utilização como base e/ou sub-bases nas camadas de pavimentação, no entanto, por diversas vezes há escassez desse material e/ou seu transporte se torna inviável devido aos custos o que, conseqüentemente, torna necessário o aproveitamento do solo as margens das estradas a serem pavimentadas.

Apesar de o solo ser um dos principais materiais utilizados em obras de engenharia civil, visto que possui baixo custo e é encontrado em praticamente todos os empreendimentos, ele comumente não satisfaz as exigências de projeto (NUÑEZ, 1991; DIEMER *et al*, 2008). Em consequência disso, a cada dia se torna mais imprescindível buscar novas alternativas para as obras de pavimentação sem elevar excessivamente os custos (GOULARTE; PEDREIRA, 2009).

É comum se encontrar solos de baixa resistência e alta deformabilidade nas camadas superiores dos solos. Isto, por diversas vezes, acarreta na escolha dos projetistas por fundações profundas, assentadas em camadas inferiores de maior resistência ou por estabilização do material inadequado, principalmente em obras de pavimentação (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2015).

Vendruscolo (1996, 2003) afirma que, apesar da técnica de estabilização de solos ser aplicada principalmente em obras de pavimentação, ela já vem sendo utilizada em outras áreas como fundações, contenção de taludes e barragens.

Uma alternativa relativamente barata e que gera uma espécie de cimentação do solo é a estabilização do solo com cales. Quando adicionados cal e água ao solo, por meio de reações químicas, as partículas de solo são aglutinadas as partículas de cal, gerando alterações de ordem físicas aos grãos de solo. Ainda, a reatividade com a cal varia de solo para solo, entretanto, sabe-se que a cal reage com os compostos pozolânicos do solo. Assim, uma alternativa para aumentar as reações e, por conseguinte, a melhora das propriedades do material é utilizar aditivos pozolânicos como a cinza volante, que além de maximizar as reações do solo a cal, produz significativo aumento da resistência e durabilidade do solo (HERRIN; MITCHELL, 1961).

Assim, a utilização de cal e cinza volante para estabilização de solos pouco resistentes é de grande valia para obras desde pavimentação a residenciais, tanto por suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais quanto por sua comprovada eficiência em outros estudos.

Contudo, devido à variabilidade do solo, não há como garantir que determinada técnica ou aditivo irá funcionar, por esse motivo é importante realizar estudos de caracterização do solo e análise das técnicas e dosagens de aditivos

mais adequadas para o mesmo, justificando assim, a presente pesquisa, que busca proporcionar subsídios, pela investigação das relações de dosagens da cal como aditivo único e da cal com o aporte da cinza volante, para que, futuramente, o município de Bom Retiro do Sul/RS, local de onde o solo foi analisado, possa utilizar-se dessas técnicas com maior confiabilidade.

1.1 Objetivo Geral

Analisar a potencialidade de usar cales ou misturas de cal e cinza volante para estabilizar solos com baixa resistência.

1.1.1 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste estudo:

- (I) Verificar a influência de diferentes teores de cal na estabilização do solo estudado;
- (II) Analisar o potencial da utilização conjunta de cal e cinza volante no melhoramento do solo estudado;
- (III) Avaliar tecnicamente qual das duas alternativas (estabilização com cal ou a estabilização pela associação da cal a cinza volante), possui maior potencial de estabilização no solo estudado.

1.2 Hipótese

Considerando o potencial da cal e da cinza volante no melhoramento de características como resistência, trabalhabilidade e durabilidade presume-se então

que as propriedades mecânicas do solo de Bom Retiro do Sul serão melhoradas e o solo estabilizado como em diversos outros solos de diferentes regiões do Brasil e de outros países do mundo.

1.3 Delimitação

O presente estudo foi restrito a realização de análises e de verificações de diferentes teores de cal e da associação da cal a cinza volante para melhoramento das características de um solo característico de Bom Retiro do Sul, com uma posterior comparação entre as duas técnicas de estabilização química.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura deste estudo foi organizada de modo a melhor apresentar as informações nele contida e viabilizar a compreensão do leitor. Deste modo, o trabalho foi dividido em 5 capítulos.

O capítulo 2 é composto por uma contextualização acerca de alguns conceitos importantes sobre estabilização de solos, assim como uns aspectos quanto aos métodos de estabilização e as características que podem ser melhoradas, com um enfoque na estabilização com cal e na estabilização pela combinação da cal com a cinza volante.

No capítulo 3 são descritos os materiais definidos para o procedimento experimental, bem como os métodos utilizados para caracterização do solo estudado, com os resultados obtidos, e o método escolhido para análise da resistência do solo após submetido as técnicas de estabilização.

Posteriormente, no capítulo 4, são descritos os resultados obtidos pelos ensaios de compressão simples e uma análise completa a partir dos dados expressos.

Por último, no capítulo 5, são evidenciadas as considerações finais a respeito das duas diferentes técnicas de estabilização química estudadas no decorrer da pesquisa – a estabilização com cal e a estabilização pela combinação da cal com a cinza volante, subsequentemente, analisadas pela realização do procedimento experimental e então, algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma breve contextualização sobre a estabilização de solos, alguns aspectos quanto aos métodos utilizados e as principais características a ser melhoradas, bem como uma revisão sobre estabilização com cal e outros aditivos pozolânicos a fim de criar uma base de conhecimentos pertinentes ao projeto experimental que será realizado.

2.1 Estabilização de solos

Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) reconhecem que muitos dos problemas patológicos de fundações encontrados na atualidade poderiam ser evitados se, em fase de projeto, uma caracterização do comportamento do solo fosse realizada a fim de detectar as diferentes propriedades do material. Brito e Paranhos (2017) apontam que, por diversas vezes, não é viável, de acordo com as especificações de projeto, utilizar o solo natural encontrado.

A utilização de solos como base para elementos de construção ou como material construtivo gera inúmeros problemas e que para resolver estes problemas há três opções:

- (I) Substituir o material inadequado por outro mais resistente;
- (II) Aceitar o solo existente e considerar as suas características na elaboração projeto;
- (III) Modificar e melhorar as propriedades do solo.

De acordo com Ingles e Metcalf (1972) o melhoramento de uma ou mais características do solo é chamado de estabilização, os métodos para estabilização são diversos, dos quais alguns são utilizados para melhorar mais de uma propriedade simultaneamente, sendo as principais consideradas em projetos: deformabilidade, resistência, permeabilidade e durabilidade. Prietto (1996) afirma que o solo, após a estabilização, passa a ser um material geotécnico singular com características próprias que devem ser consideradas.

Durante a escolha do método de estabilização a ser adotado deve-se considerar a grande variabilidade dos tipos de solos, seus comportamentos imprevisíveis e qual a características que se intenta melhorar. Um importante aspecto a ser observado que pode prejudicar a estabilização, é a área superficial específica das partículas sólidas e a sua porosidade, devido a sua influência nos processos de adsorção (JACINTO *et al.*, 2005; CESSA *et al.*, 2009).

2.2 Métodos de estabilização

Em projetos de engenharia com solos impróprios, além de considerar as características dos materiais e as propriedades que devem ser corrigidas é relevante se ponderar o custo total da obra e sua finalidade, alterações extremas, como por exemplo, a total retirada do solo e substituição por um com melhores características mecânicas, devem ser cogitadas somente como último recurso (AZEVEDO, 2010).

Deste modo, a estabilização de solos inadequados é a alternativa mais simples e com o melhor custo-benefício para melhorar as propriedades específicas do solo, tanto de forma natural quanto de forma artificial, a fim de garantir a

resistência e durabilidade de obras de engenharia (BASHA *et al.*, 2005; SILVA, 2007).

Segundo Ingles e Metcalf (1972) e Basha *et al* (2005) as maneiras de alterar as propriedades dos solos são diversas devido a sua grande variabilidade, deste modo, um método pode ser adequado para um tipo de solo, mas não ser bem sucedido para outro com características distintas. As técnicas de estabilização podem ser divididas basicamente em três categorias: mecânicas, físicas – também chamadas de térmicas – e químicas (INGLES; METCALF, 1972). A tabela 1 apresenta alguns tipos de solos com os métodos que, usualmente, melhor se adéquam.

Tabela 1 – Resposta dos Principais Componentes de Solos à Estabilização

Principal Componente do Solo	Estabilizantes Recomendados	Motivos
Matéria Orgânica	Mecânica	Outros métodos ineficientes
Areias	Argila	Maior estabilidade mecânica
	Cimento	Maior densidade e coesão
	Betume	Maior coesão
Siltes	Desconhecido	
Alofanos	Cal	Reações pozolânicas e densificação
Caulinitas	Areia	Maior estabilidade mecânica
	Cimento	Ganho rápido de resistência
	Cal	Ganho rápido de trababilidade e resistência a longo prazo
Ilinitas	Cimento	Ganho rápido de resistência
	Cal	Ganho rápido de trababilidade e resistência a longo prazo
Motmorillonitas	Cal	Ganho rápido de trababilidade e resistência inicial
Cloritas	Cimento	Motivação apenas teóricas (carência de relatos de experiências)

Fonte: Adaptado pela autora com base em Ingles e Metcalf (1972).

Solos granulares, como as areias, não obtêm resultados significativos com a adição de cal, sendo preferíveis cimento e betume e, em alguns casos, materiais mais finos, como a argila, a fim de melhorar a distribuição granulométrica. Já materiais de granulometria mais fina como as Ilinitas, as Caulinitas, as Montmorillonitas e as Alofanos manifestam melhoras quando estabilizados com cal, pois minerais presentes em sua estrutura quando em contato com a cal sofrem reações pozolânicas. Há, ainda, os solos com predominância de matéria orgânica ou silte, que não apresentam melhoras significativas quando estabilizados quimicamente. De modo geral, a estabilização com cimento gera bons resultados em diferentes solos, entretanto, seu custo de implantação é maior

Segundo Nóbrega *et al.* apud Corrêa (2008) é importante conhecer as características próprias de cada material, pois cada solo reage de maneira singular aos diferentes aditivos, deste modo para que a melhoria esperada ocorra é necessário compreender não só as propriedades do material a ser melhorado, como também do aditivo estabilizante.

2.2.1 Estabilização mecânica

Os métodos de estabilização mecânica buscam melhorar as propriedades do solo sem a adição de materiais estranhos ao solo. O processo de estabilização mecânica trata-se basicamente da compactação do solo por pressão, impacto ou vibração, a fim de diminuir o número de vazios entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, aumentar a impermeabilidade e a resistência ao cisalhamento, pressupondo que a resistência do solo depende essencialmente da sua compactidade (DIEMER *et al.*, 2008).

Esse estado de maior compactidade ou densidade maior depende essencialmente da curva de umidade ótima característica do solo analisado, uma vez que cada solo possui sua umidade ótima, independente do método de compactação utilizado, sendo que a compactidade pode ser inferior se a compactação for realizada no solo com a umidade inferior ou superior a ótima (VENDRUSCOLO, 1996).

A compactação é feita por equipamentos mecânicos, principalmente por rolo compactador, mas em alguns casos, onde a área a ser compactada é menor, são utilizados até mesmo soquetes manuais, entretanto a compactação manual não possui o mesmo controle tecnológico que se obtém quando usados métodos automáticos, nos quais é possível se estabelecer até mesmo a energia de compactação das camadas do solo (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Além de por compactação do solo, a estabilização mecânica pode ser feita por correção granulométrica e por drenagem, também para redução do índice de vazios e aumento da densidade do solo, mas em geral estas técnicas não são empregadas sozinhas, mas sim, combinadas a estabilização por compactação (NUÑEZ, 1991).

2.2.2 Estabilização Física

O processo de estabilização física, também conhecida como estabilização térmica, ocorre por meio de alterações físicas no solo, como por exemplo, o aumento ou diminuição da temperatura do material e a mudança da fração líquida do solo – reações de hidratação – através de processos como o de evaporação e o de adsorção (NUÑEZ, 1991).

De acordo com Vendruscolo (2003) a estabilização física, se dá pela utilização de calor ou eletricidade para ocasionar alterações nas características do solo. A estabilização com uso de eletricidade consiste basicamente em passar uma corrente de eletricidade pelo solo inadequado a fim de adensá-lo, seja em solos arenosos ou argilosos, no entanto a tensão a ser aplicada varia, de altas descargas a baixas, conforme a quantidade predominante de material (SILVA, 2007). Já a estabilização térmica, por calor, é realizada pela aplicação de energia térmica pelos processos de aquecimento, congelamento e termo-osmose.

2.2.3 Estabilização química

A estabilização química nada mais é que a modificação das propriedades do solo para melhorar seu comportamento. As características a serem melhoradas variam de solo para solo e dependem da escolha do projetista.

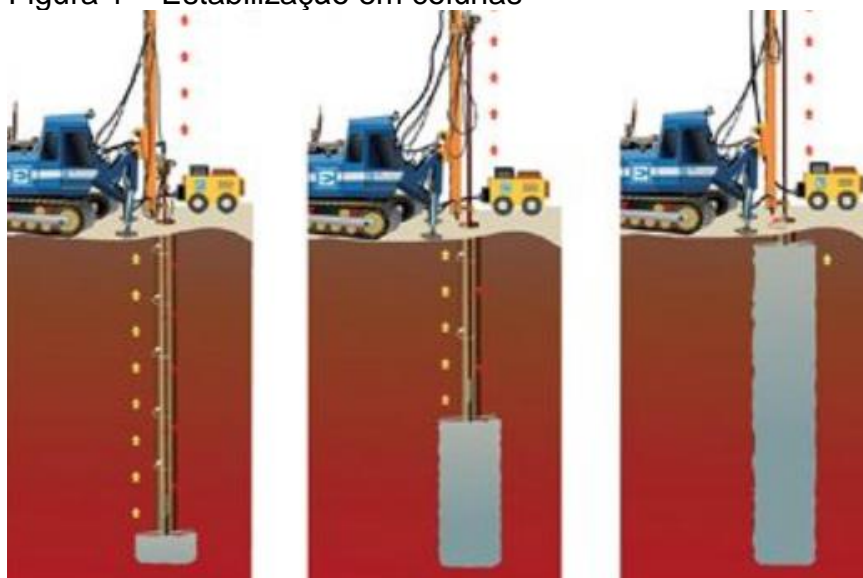
As alterações das propriedades ocasionadas por estabilização química são permanentes e ocorrem por meio de reações físico-químicas entre o agregado e o aditivo adicionado através da ligação das partículas dos materiais constituintes, semelhante às reações que ocorrem na produção do concreto, mas menos resistentes devido a reações estarem ligadas a agregados mais finos, sendo que estas reações podem ser primárias ou secundárias dependendo das características do solo (VENDRUSCOLO, 2003).

De acordo com Silva (2007, p.12) essa estabilização pode ocorrer por quatro reações diferentes: "substituição das moléculas de água e cátions adsorvidos por cátions hidrorrepelentes; estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes; floculação e dispersão".

Os dois métodos mais utilizados de estabilização química são: a estabilização com cimento e a estabilização com cal (NUÑEZ, 1991; DEGIRMENCI; OKUCU; TURABI, 2007). Além disso, aditivos pozolânicos como a cinza volante e o fosfogesso, resíduos provenientes de indústrias, podem ser adicionados ao solo-cal ou ao solo-cimento para melhorar ainda mais as características do solo (DEGIRMENCI; OKUCU; TURABI, 2007; KOWALSKI; STARRY; AMERICA, 2007).

A estabilização profunda de um solo *in situ* pode ser realizada por duas técnicas diferentes ou pela combinação das mesmas. A primeira, a estabilização em colunas é basicamente a execução de colunas com o material estabilizado no solo local (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT apud PAULA, 2013). Na Figura 1 apresenta-se uma imagem ilustrativa da técnica estabilização em colunas.

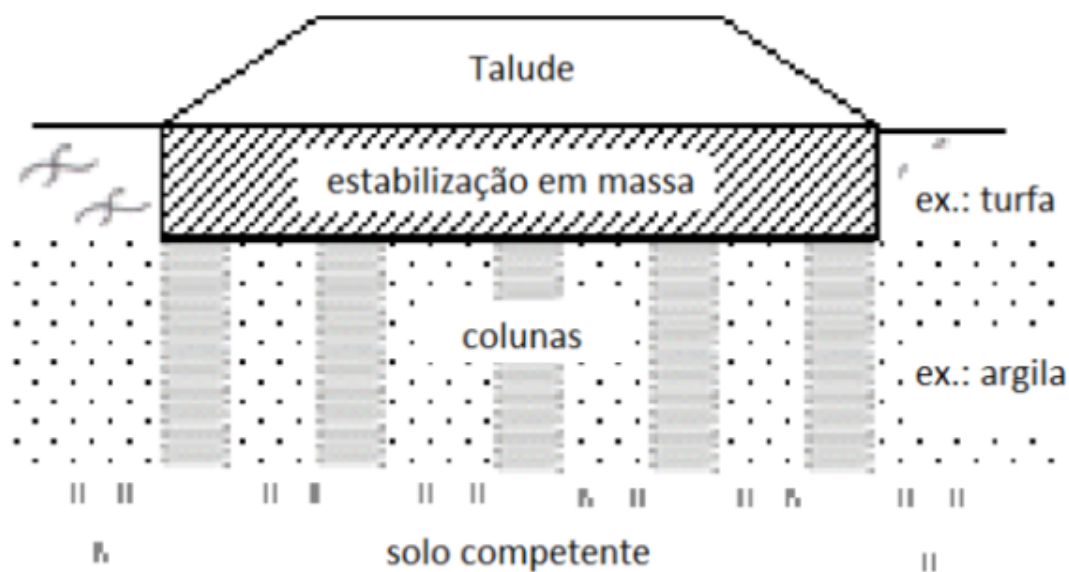
Figura 1 – Estabilização em colunas



Fonte: Nakamura (2011, p. 1).

Já a segunda, a estabilização em massa, é o melhoramento de todo o volume de solo inadequado, atingindo em média, profundidades de cinco metros (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT apud PAULA, 2013). Na Figura 2 apresenta-se uma imagem ilustrativa da técnica estabilização em massa em conjunto com a técnica de estabilização em colunas.

Figura 2 – Estabilização em massa e em colunas



Fonte: Building Research Establishment apud Paula (2013, p. 27).

A finalidade dessas técnicas, de acordo com o Building Research Establishment apud Paula (2013), é aumentar a resistência e capacidade de carga de solos moles, melhorar a deformabilidade desse material e o comportamento dinâmico dos mesmos, bem com diminuir os recalques.

2.3 Estabilização com cal

Estudos sobre a utilização da cal para a estabilização de solos com baixa capacidade de suporte de carga existem a mais de 50 anos, nos Estados Unidos em torno da década de 60, muitos departamentos de estradas já estavam desenvolvendo especificações e procedimentos para o emprego da cal em bases e sub-bases em obras de pavimentação (BELL, 1996; KOWALSKI; STARRY; AMERICA, 2007).

De acordo com Corrêa, Marcon e Triches (2009) a estabilização com cal torna possível a utilização dos solos lindeiros às rodovias, que por diversas vezes não atendem as necessidades de projeto. Segundo os autores ainda, a cada dia mais aumenta a preocupação com as deformações das camadas constituintes das rodovias, em utilizar os materiais disponíveis nas proximidades e economizar.

A cal é produzida pelo aquecimento do carbonato de cálcio (calcário natural) em fornos até que seja expelido o dióxido de carbono. O óxido de cálcio que fica no forno e é posteriormente usado é conhecido como cal viva, da qual se obtém a cal hidratada pelo processo natural de endurecimento da cal pela absorção do gás carbônico presente no ar (INGLES; METCALF, 1972).

É característico de solos coesivos ter sua estrutura aglutinada e dispersa, o que os torna mais suscetíveis a ação da água e que, por conseguinte, influi na resistência do material, deste modo a cal se sobressai como uma forma de estabilização mais econômica e ecológica, com resultados relevantes no aumento da resistência e durabilidade do solo (GOULARTE; PEDREIRA, 2009).

A técnica de estabilização com cal é muito parecida com a de estabilização com cimento, no entanto, a estabilização com a cal hidratada é mais indicada para

solos argilosos e não é muito recomendada para solos granulares, ainda assim a cal é um estabilizador muito versátil (INGLES; METCALF, 1972).

2.3.1 Reações solo-cal

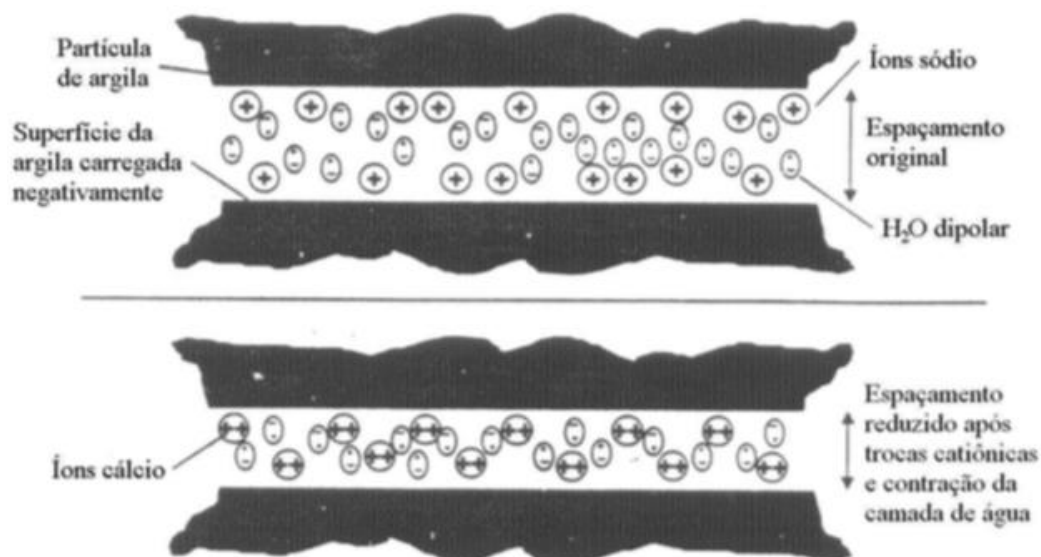
Segundo Nuñez (1991) para determinar os tipos de solos que reagem com a cal e adquirem significativas melhoras em suas propriedades é necessário avaliar pelo menos duas características específicas para solos tropicais ou subtropicais: a quantidade de sílica ou alumina presente no material – constituintes do solo que participam das reações pozolânicas, e os processos pelos quais o solo passou em sua formação.

A utilização de cal hidratada é bastante difundida em todo o mundo, com diversas pesquisas relacionadas às reações que a cal provoca quando misturada ao solo, no entanto, algumas reações provocadas por este aditivo ainda são um incógnita, principalmente quanto a sua eficácia em diferentes solos. Sua efetividade maior é expressa em solos argilosos pesados (EADES; RALPH, 1960; INGLES; METCALF, 1972).

Quando adicionada a solos finos a cal reage com o material e gera alterações de ordem físico-químicas, admite-se que essas mudanças nas características do material ocorram por quatro diferentes fenômenos: a floculação – união das partículas finas em um agregado maior, a carbonatação – que ocorre devido aos componentes de gás carbônico presentes no ar, a adsorção – que gera a aglutinação de partículas sólidas em um meio líquido, e a as reações pozolânicas – responsáveis pela estabilização e consolidação do solo (THOMÉ, 1994).

O conceito de que a floculação que ocorre com adição de cal possui um importante papel na estabilização solo-cal é inapropriado, pois alguns solos já estão floculados na natureza e não são estáveis. A floculação está associada a melhoria de características como a plasticidade (DIAMOND; KINTER, 1965). Na Figura 3 apresenta-se o processo de floculação que ocorre pela troca de íons.

Figura 3 – Processo de floculação



Fonte: Prusinski e Bhattacharja apud Dalla Rosa (2009, p. 106).

Diferente da floculação que melhora a plasticidade, os processos de adsorção da cal pelo solo e as reações pozolânicas, que geram cimentação, estão relacionadas à estabilização do solo, pelo ganho de resistência e durabilidade (DIAMOND; KINTER, 1965).

Bell (1996) afirma que todos os minerais constituintes de solos argilosos reagem em maior ou menor porcentagem com a cal, principalmente pelo processo de floculação que ocorre na troca de íons, cuja ação altera a densidade do solo, devido a aproximação das partículas que, quando aglutinadas, formam partículas maiores, essa floculação é a responsável pela melhora na plasticidade do solo. De acordo com o autor ainda, a adição ideal de cal para as alterações máximas quanto a plasticidade do solo deve ficar entre 1 e 3%, superior a isso as alterações pela associação da cal são utilizadas para modificar a resistência do solo.

2.3.2 Alterações nas propriedades dos solos com adição de cal

Propriedades como a plasticidade e a probabilidade são melhoradas em solos finos quando adicionados a eles cal, além disso, a adição de cal gera melhorias na

variação de volume do solo – redução da expansibilidade e aumento do limite de contração, contudo, nem todos os materiais têm sua resistência e durabilidade melhoradas com a cal (THOMÉ, 1994).

Herrin e Mitchell (apud NUÑEZ, 1991) apontam que com a adição de cal o índice de plasticidade (IP) dos solos tende a diminuir isso ocorre, pois quando associado cal a solos finos o limite de plasticidade (LP), geralmente, aumenta enquanto o limite de liquidez (LL) diminui, visto isso, os autores afirmam ainda, que com a diminuição do IP o limite de contração é ampliado (LC), além de melhorar a trabalhabilidade.

A melhora da plasticidade e um ligeiro aumento da resistência mecânica ocorrem rapidamente, devido às reações imediatas que ocorrem de floculação e adsorção, já em longo prazo as reações pozolânicas tendem a aumentar mais significativamente a resistência e a durabilidade do solo estabilizado (GOULARTE e PEDREIRA, 2009).

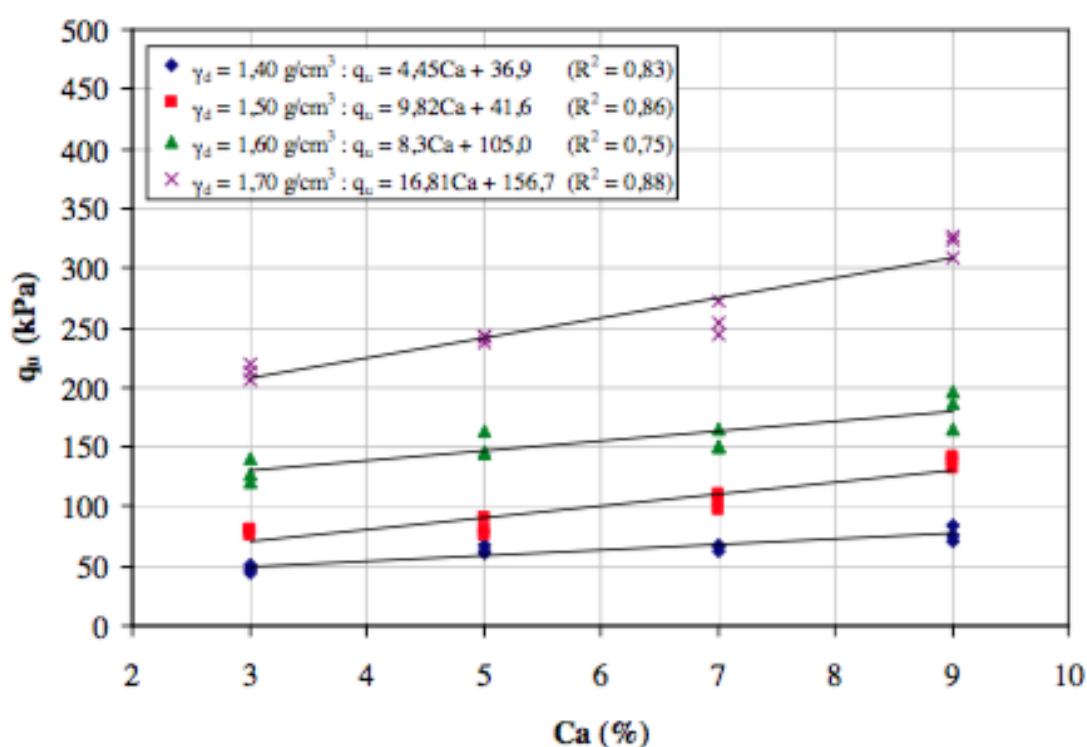
2.3.3 Comportamento das misturas solo-cal

Quando estabilizados, os solos sofrem alterações em suas propriedades geotécnicas, tendendo a ter um aumento de sua resistência e rigidez, ao mesmo tempo em que sua compressibilidade – deformabilidade, reduz e sua permeabilidade varia, aumentando em solos argilosos e diminuindo em solos granulares. (PRIETTO, 1996).

Craig e Knappett (2018) afirmam que uma análise da distribuição granulométrica do solo em um primeiro momento, é importante para classificar o solo e identificar a partir disso, comportamentos característicos do material, como a resistência. Solos resistentes são, principalmente, solos bem graduados, enquanto solos finos e/ou com elevados índices de limite de liquidez e plasticidade estão sujeitos a baixas resistências (ALMEIDA, 2005; CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, 2015).

De acordo com Dalla Rosa (2009), a resistência dos solos, quando estabilizados com cal, aumenta linearmente com o aumento da porcentagem de cal, mesmo com pequenas adições de cal, como demonstrado na Figura 4, ainda, para o solo estudado pela autora – Solo Residual de Arenito Botucatu, com o aumento de 6% do teor de cal, foi possível observar um acréscimo de cerca de 55% da resistência.

Figura 4 – Variação da resistência a compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras



Fonte: Dalla Rosa (2009, p. 80).

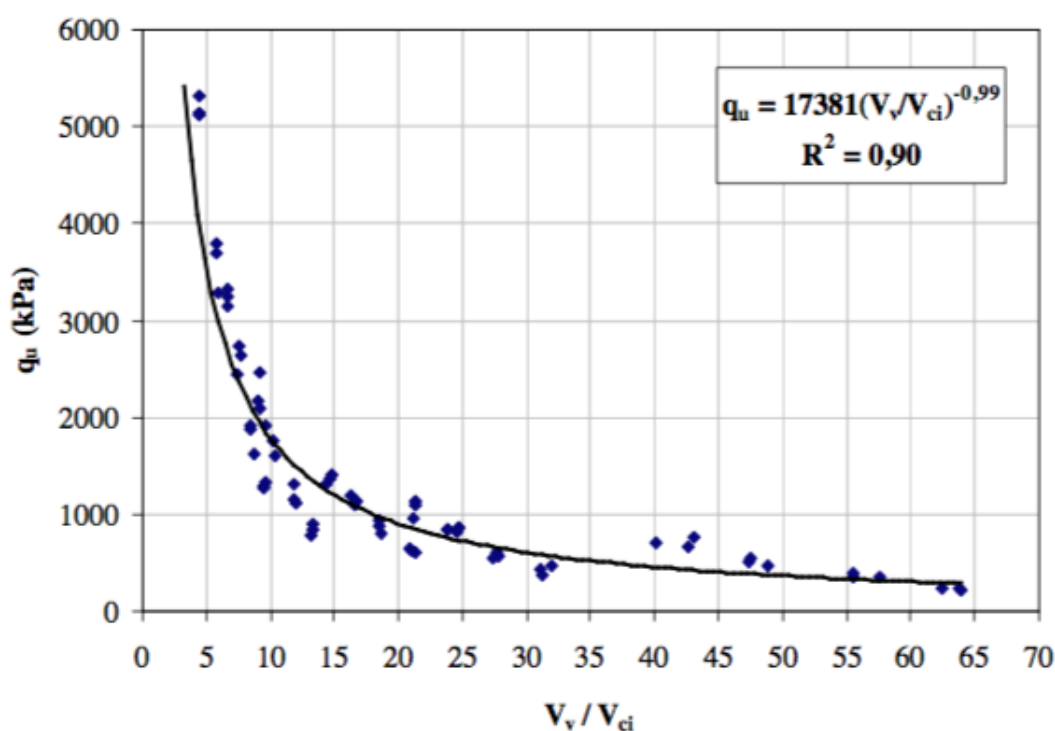
Segundo Caputo (1988) essa propensão dos solos a suportar cargas e se manter estável depende da resistência do solo ao cisalhamento que é avaliada, essencialmente, em função da coesão e do ângulo entre as partículas do solo, que não são parâmetros constantes de um material e variam com base no estado em que ele está.

A resistência do material depende então, basicamente, da quantidade de vazios e líquidos encontrados, pois o solo é constituído sobretudo de três fases – partículas sólidas, líquido e ar – número de vazios, (PINTO, 2006). De acordo com Dalla Rosa (2009), diversos estudos comprovam que a resistência de solos estabilizados com materiais de propriedades cimentantes pode ser estimada pela relação de vazios, conforme a Equação 1:

$$\frac{V_V}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume de vazio (ar+agua)}}{\text{Volume de cimento}} \quad (1)$$

No entanto, utiliza-se como base estudos realizados acerca da relação vazios/cimento por meio de ensaios de compressão simples, conforme Figura 5, pela falta de trabalhos que relacionem a quantidade de cal/vazios (DALLA ROSA, 2009). O solo analisado por Foppa (2005), arenito Botucatu, apresentou aumento da resistência com a redução do numero de vazios, indicando uma maior eficiência da cimentação nas misturas mais compactas.

Figura 5 – Relação entre o fator de vazios e a resistência a compressão simples

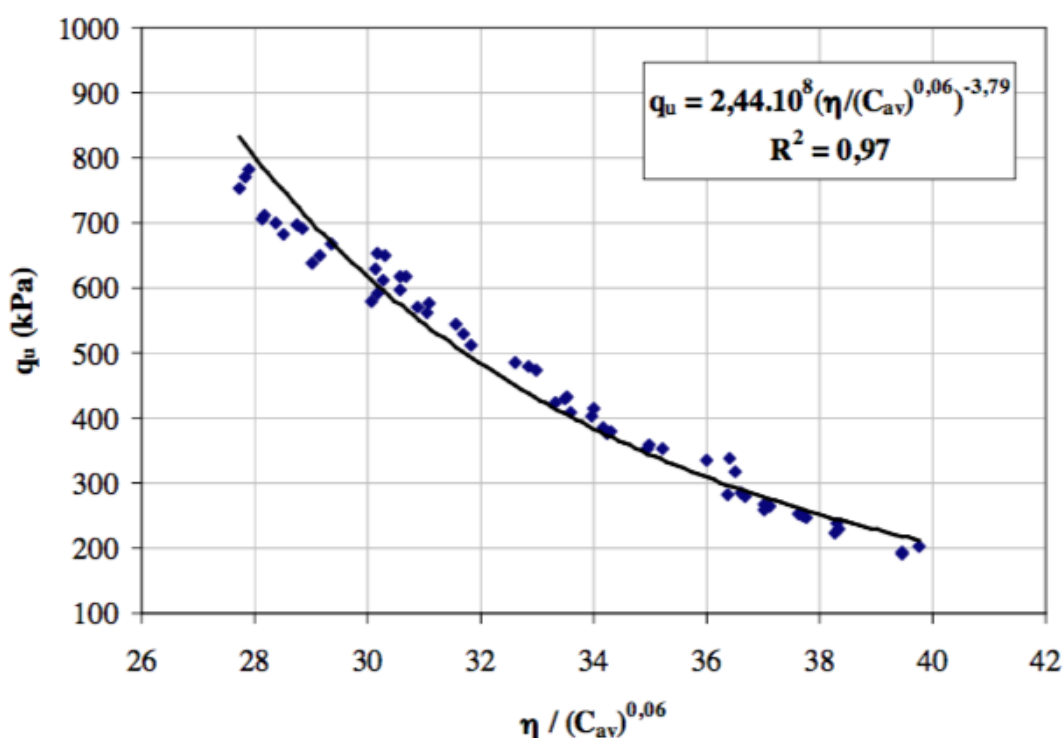


Fonte: Foppa (2005, p. 87).

Quando sujeitos a carregamentos, os solos podem vir a deformar, ou seja, sofrer mudanças em seu volume – que ocorrem quando há a compressibilidade das camadas, e em sua forma – decorrente de escoamento plástico gerado por tensões que são capazes de conduzir o solo a ruptura, quando o carregamento ultrapassa a resistência do mesmo (CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, 2015). Assim, quanto maior a resistência a compressão simples do solo (q_u), aumentada pela redução de vazios no solo preenchidos com aditivos, menor a sua deformabilidade e maior sua capacidade de suporte.

Entretanto, para avaliar realmente o comportamento tensão-deformação do solo – que na natureza, geralmente, encontra-se não drenado, uma relação entre a porosidade do solo e o teor volumétrico de cal também foi analisada, como demonstrado na Figura 6 (DALLA ROSA, 2009). De acordo com Lopes Junior (2007), mesmo com os ajustes indicados, a relação η/C_{av} apresenta variáveis proporcionais a relação V_v/V_{ci} , sendo apenas uma forma mais refinada de apresentar os resultados.

Figura 6 – Relação entre a porosidade do solo pelo teor volumétrico de cal e a resistência a compressão simples



Fonte: Lopes Junior (2007, p. 104).

A porosidade dos solos está diretamente relacionada ao número de vazios do material, que tende a ser maior em solos mal graduados ou de dimensão dos grãos maior, sendo seu coeficiente dado pela razão entre o número de vazios e o volume total da amostra analisada (CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, 2015).

Geralmente, quanto maior os poros, maior a permeabilidade, essa redução da porosidade em solos estabilizados ocorre pela cimentação das partículas menores em partículas maiores, ocasionando uma restrição do movimento da água dentro do solo que, modifica argila em uma espécie de areia com maior resistência e maior permeabilidade e, melhora a distribuição granulométrica de solos granulares mal graduados (CORRÊA, 2008).

O escoamento da água pelos solos pode causar desde instabilidade a ruptura do solo, solos menos permeáveis, ou seja, com baixos coeficientes de permeabilidade, tendem a reter mais água em sua estrutura e estão mais suscetíveis a instabilidade e deslizamentos enquanto solos mais permeáveis, com maiores coeficientes de permeabilidade, não são tão suscetíveis a saturação devido a velocidade que o fluido escoa por seus vazios (BENTO, 2006; PINTO, 2006).

2.3.4 Método de dosagem solo-cal

A alteração de propriedades do solo com a utilização de cal como: melhora da plasticidade, inchamento, retração ou resistência a compressão simples do solo, ocorre por uma série de reações, entretanto, para determinar a quantidade ideal de cal a ser adicionada ao solo é necessária a realização de ensaios (EADES e GRIM, 1966; NUÑEZ, 1991).

Após diversos testes acerca de características mineralógicas, físicas e químicas dos solos não tratados e tratados com cal foi constatado que testes simples de pH são capazes de determinar a quantidade necessária de cal para a estabilização dos solos. O método consiste, essencialmente, em testar diferentes porcentagens de cal a fim de elevar o pH da mistura solo-cal para 12,4 ou mais e manter constante esse valor para descobrir a porcentagem mínima de cal a ser

utilizada para que ocorra as reações pozolânicas (EADES e GRIM, 1966).

2.4 Mistura Cal-Cinza Volante

Segundo Kowalski, Starry e America (2007) outra alternativa efetiva para o método de estabilização química, mas mais cara, é a utilização de dois ou mais aditivos no processo de melhoramento do solo a fim de melhorar diferentes propriedades do material inadequado.

A utilização de subprodutos (materiais residuais da indústria) como a cinza volante, a cinza de casca de arroz e as escórias de alto-forno, bem como o reaproveitamento de outros materiais alternativos vêm sendo estudados por diversos autores para a estabilização de solos pouco resistentes (KOWALSKI; STARRY; AMERICA, 2007; BORGES; SILVEIRA, 2016).

Cinzas volantes são constituídas por quantidades significativas de alumina e sílica (NLA, 2004). Segundo Otokoto (2014) o emprego de cinza volante como material estabilizante aumenta exponencialmente a resistência dos solos, diminui o teor de umidade ótima do mesmo, bem como o seu número de vazios e a expansão de solos expansivos. De acordo com o autor ainda, solos estabilizados com cinza volante exibem maior durabilidade e resistência ao congelamento e descongelamento devido às diferenças de temperatura.

Uma alternativa para reduzir os custos e garantir algumas das melhorias que a cinza volante propicia aos solos é utilizá-la em conjunto a cal. Segundo Leon *et al.* (2015), devido a abundância das cinzas, volante e da casca do arroz, no estado Rio Grande do Sul, a estabilização química do solo com cal – que é o estabilizante mais econômico, e cinza volante resulta em uma redução ainda maior dos custos, além de ser uma alternativa mais ecológica. A mistura cal-cinza volante pode ser associada ao solo de duas formas (NLA, 2004):

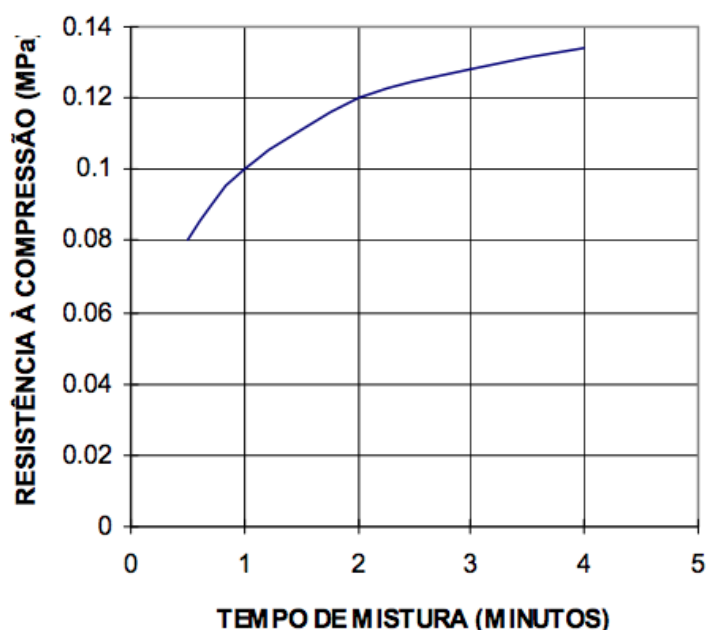
- (I) Misturando-se a cinza volante e a cal nas proporções definidas antes, para então depois adicionar a mistura ao solo;

- (II) Misturando-se a cal com umidade adequada ao solo para elevar a umidade do solo em 3% acima da umidade ótima primeiro para, em seguida, adicionar-se a cinza volante acrescentando água conforme necessário.

De acordo com Dalla Rosa (2009) a medida que a porcentagem de cinza volante adicionada ao solo aumenta, a resistência do mesmo aumenta também, isso ocorre em função das reações que os componentes presentes na cinza (alumina e sílica) provocam quando misturados a cal (hidróxido de cálcio) e a água.

As reações que ocorrem quando associada à sílica/alumina da cinza ao hidróxido de cálcio da cal ocasiona elementos cimentantes (silicato e aluminato de cálcio hidratado) que, por conseguinte, aumentam exponencialmente a resistência do solo estabilizado. Entretanto, esse aumento da resistência pode variar por uma série de fatores, sendo um deles a homogeneidade da mistura (MALLMANN, 1996). Segundo Ahlberg e Barenberg apud Mallmann (1996) não só a resistência como a durabilidade pode ser, consideravelmente, alterada pela uniformidade da mistura. Na Figura 7, apresenta-se resultados de resistência a compressão simples a diferentes tempos de mistura.

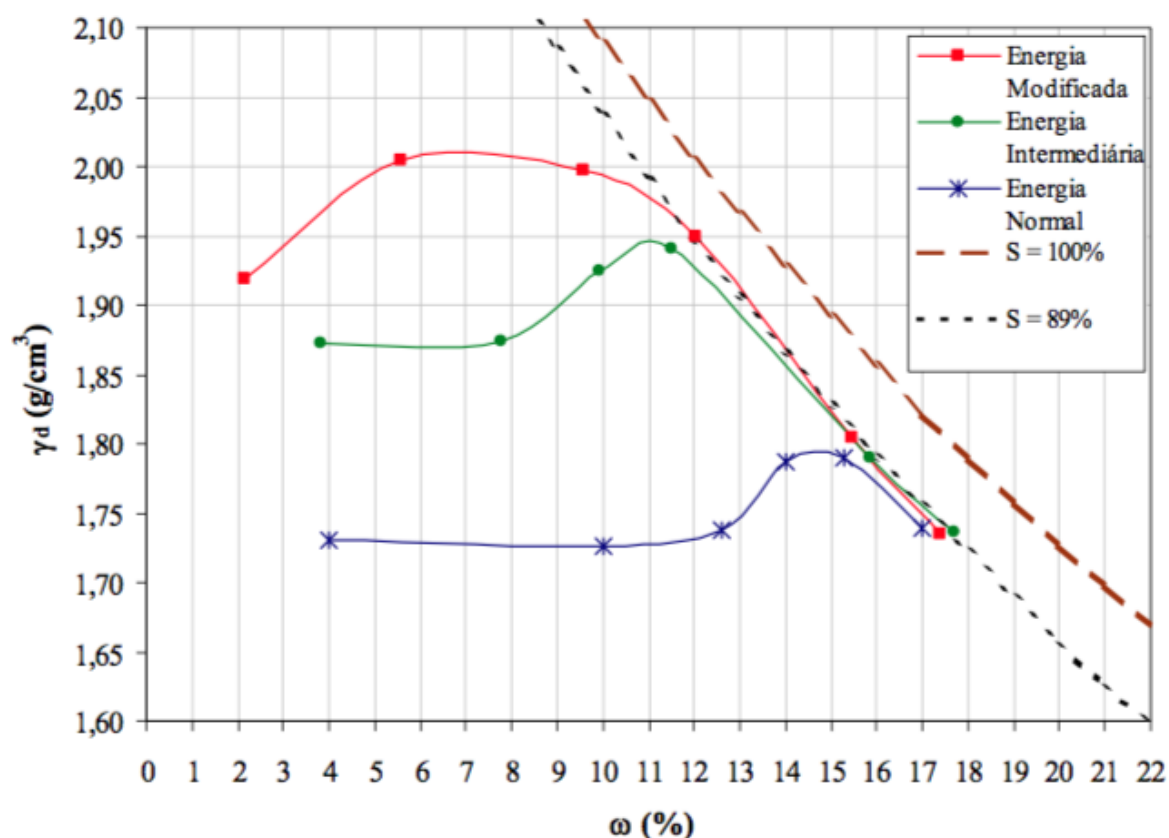
Figura 7 – Resultados de resistência a diferentes tempos de mistura



Fonte: Ahlberg e Barenberg apud Mallmann (1996, p. 42).

Além do tempo de mistura, a resistência de solos estabilizados com cal e cinza volante é, fortemente, influenciada pela energia de compactação, como demonstrado na Figura 8, onde apresenta-se as curvas de compactação as energias normal, intermediária e modificada do ensaio de compactação.

Figura 8 – Curvas de Compactação de Solo Residual de Arenito Botucatu



Fonte: Foppa (2005, p. 69)

Conforme pode-se verificar na Figura 8, quando compactados os corpos de prova (CPs) para o ensaio de compressão simples, a energia modificada, a densificação atingida pelo solo estabilizado é consideravelmente maior que quando a compactação é feita a energia normal (MALLMANN, 1996; FOPPA, 2005; DALLA ROSA, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são expostos os materiais utilizados para realização do presente estudo e suas características, bem como os métodos de caracterização dos mesmos e o método definido para análise da resistência, objetivo principal do programa experimental.

3.1 Caracterização dos materiais

Quando adicionado cal ou cinza volante ao solo, suas características são alteradas por meio de diferentes reações químicas (THOMÉ, 1994). A fim de se entender as alterações geradas pelos aditivos selecionados, é importante caracterizar o solo extraído, assim como os outros materiais usados. Inicialmente, foi definido o solo e, posteriormente, após uma revisão da bibliografia existente, foram selecionados os materiais para a estabilização, como apresentado a seguir.

3.1.1 Solo

O solo selecionado para realização do presente trabalho foi extraído da localidade de Linha Cupido, interior de Bom Retiro do Sul – RS. O local da extração,

conforme demonstrado na Figura 9, encontra-se a aproximadamente 1 km da RS-128 e 350 metros da BR-386, nas coordenadas geográficas 29°33'45.8" S, 51°52'51.2" W, a uma distancia de 100 km de Porto Alegre. A jazida, local exato de coleta do solo, é indicada no mapa pelo marcador amarelo.

Figura 9 – Visão aérea do local de extração do solo



Fonte: Adaptado pela autora com base no Google Earth (2018).

Na Figura 10, pode-se observar a jazida de onde o solo foi extraído (a) e o solo utilizado para estudo. Foi definido esse solo para estudo (b) pelo fato de o mesmo apresentar características comuns a diversos outros locais do município e pela região da jazida ser uma área de expansão econômica do município, onde várias novas vias estão sendo abertas e, futuramente, serão pavimentadas.

Figura 10 – Solo utilizado para o estudo: jazida de onde o solo foi extraído (a) e o solo disposto em uma bandeja (b).



Fonte: Autora (2018).

Depois de feita a extração do solo, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos e transportadas ao Laboratório. As amostras foram dispostas em bandejas metálicas e reservadas, para secagem até a umidade higroscópica, depois de alcançada a umidade higroscópica foi realizado o destorroamento da amostra e verificado se o solo passava integralmente na peneira de 4,8 mm, como indicado pela NBR 6457 (ABNT, 2016), para posterior caracterização.

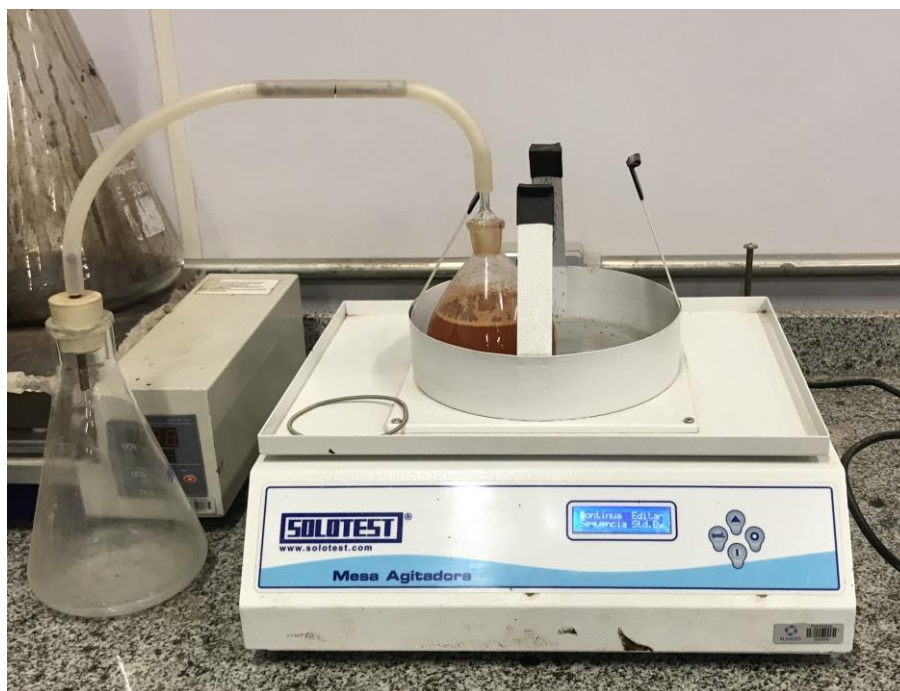
3.1.1.1 Massa específica real dos grãos

Para realização do ensaio de massa específica, reservou-se 250 g de solo preparado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). Primeiro foi medida a massa do picnômetro e a massa do picnômetro repleto de água.

A próxima etapa foi a retirada de parte da água e o acréscimo da amostra de solo separada. Para retirada dos vazios, o picnômetro com água e solo foi submetido ao aparelho de vácuo por 15 minutos como especificado pela NBR 6458 (ABNT, 2016) e como demonstrado na Figura 11. Por último, o frasco foi preenchido

até o topo com água e pesado novamente. Esse procedimento foi repetido mais duas vezes e a partir da média dos ensaios a massa específica obtida para o solo foi de $2,55\text{g/cm}^3$.

Figura 11 – Ensaio de massa específica do solo



Fonte: Autora (2018).

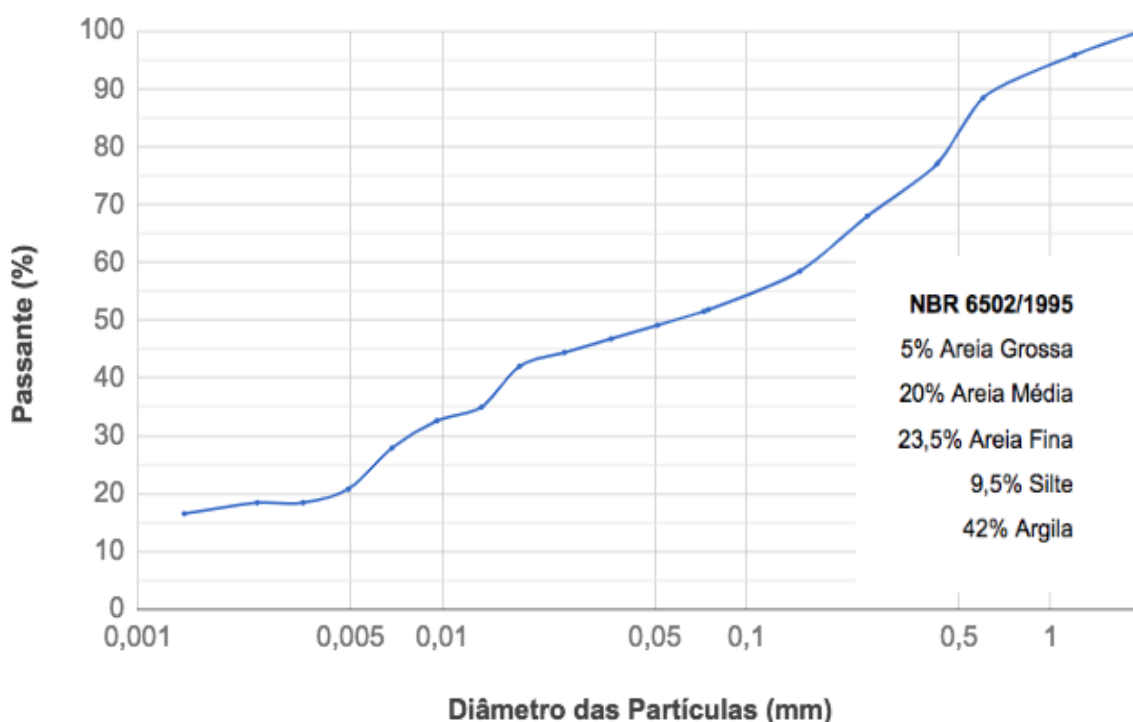
3.1.1.2 Ensaio de granulometria

A análise granulométrica foi feita por peneiramento e sedimentação em conformidade com a NBR 7181 (ABNT, 2016). Primeiramente, foi passada uma amostra na peneira 2,0 mm de modo a isolar o material fino da fração mais grossa, o material passante na peneira foi reservado na estufa para secar por 24 horas.

Como o solo não apresentou material de fração grosseira foi necessário realizar o processo de sedimentação, descrito na NBR 7181 (ABNT, 2016). Do material passante na peneira 2,0 mm foi separada uma amostra de 70g e realizado o ensaio de sedimentação, após efetuada todas as leituras fez-se a lavagem do material na peneira de 0,075mm. Em seguida levou-se esse material para a estufa

novamente até a constância da massa. Com esse material obtido foi feito o peneiramento nas peneiras 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm. Com os resultados obtidos pelo ensaio de sedimentação e pelo peneiramento fino foi possível formar a curva granulométrica do solo expresso na Figura 12.

Figura 12 – Curva granulométrica



Fonte: Autora (2018).

Como apresenta-se no gráfico da Figura 12, mais de 50% da amostra passou na peneira de menor abertura (#200). Do conjunto total da amostra, 5% são de areia grossa, 20% de areia média, 23,5% de Areia Fina, 9,5% de Silte e 42% de Argila, conforme indicação da NBR 6502 (ABNT, 1995).

3.1.1.3 Limites de Atterberg

De acordo com Pinto (2006), para classificar e identificar a consistência de um solo é necessário realizarem-se ensaios de liquidez e plasticidade, também

chamados de Limites de Atterberg, a fim de determinar o comportamento do solo quando sujeito a diferentes teores de umidade.

A determinação do Limite de Liquidez (LL) foi efetuada conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016). Para a realização do ensaio foi apanhado cerca de 250 g de solo, preparado segundo a NBR 6457 (ABNT, 2016), e disposto em uma vasilha de porcelana. Então, aos poucos, foi-se acrescentando água e homogeneizando a mistura até formar uma pasta.

A pasta formada pela mistura do solo com a água, com o auxílio de uma espátula, foi moldada a concha do aparelho de Casagrande. Imediatamente após, foi realizada uma ranhura na pasta disposta na concha, tal como na Figura 13, e contado quantos golpes eram necessários para unir as bordas da ranhura ao longe de 13 mm de comprimento. Esse procedimento foi repetido mais quatro vezes. Na Figura 14, apresenta-se o gráfico obtido pelo ensaio de Limite de Liquidez.

Figura 13 – Realização do ensaio de liquidez: Solo moldado à concha do aparelho de Casagrande (a) e ranhura realizada na pasta (b).



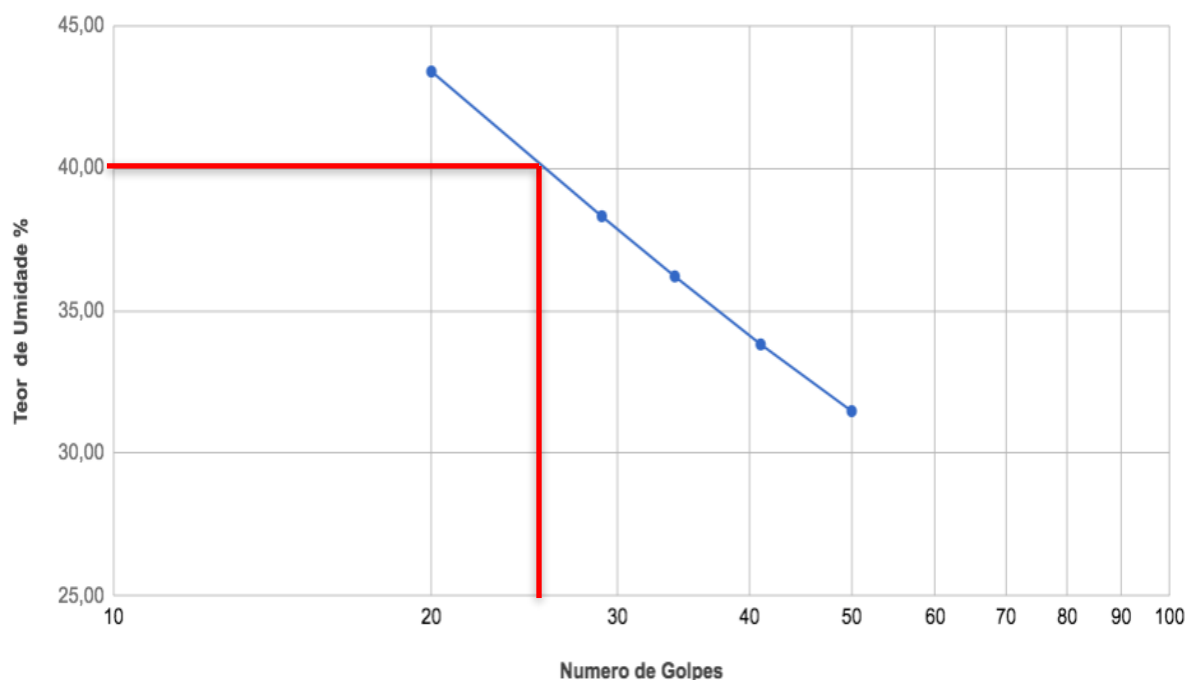
(a)



(b)

Fonte: Autora (2018).

Figura 14 – Gráfico Limite de Liquidez



Fonte: Autora (2018).

Ainda segundo a NBR 6457 (ABNT, 2016), a partir do gráfico, é possível determinar o limite de liquidez, sendo que este é a umidade que o solo precisa para a ranhura ser fechada com 25 golpes. No entanto, para determinar o LL os valores do eixo x devem estar em escala logarítmica. Como observado na Figura 14, o LL encontrado para o solo analisado foi de 40.

Para o ensaio do Limite de Plasticidade (LP) também tomou-se uma amostra de 250 g de solo, que foi misturado com uma certa quantidade de água em uma vasilha de porcelana e homogeneizado até formar uma pasta.

Aproximadamente 10 g dessa pasta foi tomada e formada uma bola. Essa bola foi rolada sobre uma placa de vidro até formar um cilindro de cerca de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, como o gabarito, sem fragmentar, assim como apresentado na Figura 15. Então, amassou-se o cilindro formado e refaz-se-o mais uma vez, quando o cilindro começou a se fragmentar, com as dimensões do gabarito, transferiu-se-o para uma cápsula, para posteriormente determinar-se o teor de umidade da amostra.

Figura 15 – Ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Autora (2018).

Repetiu-se todo o procedimento mais duas vezes e, então, foi calculado a média como exposto pela NBR 7180 (ABNT, 2016). Na tabela 2, apresentam-se os valores obtidos no ensaio de Limite de Plasticidade.

Tabela 2 – Valores do ensaio de Limite de Plasticidade

Cápsula	Peso Solo Umido	Peso Solo Seco	Peso Agua	Teor de Umidade
24	2,083	1,593	0,49	30,76
21	1,962	1,566	0,40	25,29
91	1,717	1,310	0,41	31,07
Média obtida =				29,04

Fonte: Autora (2018).

O limite de plasticidade do solo é de 29. Com os valores obtidos pelos ensaios de liquidez e plasticidade, calculou-se então o Índice de Plasticidade (IP), que nada mais é que, a subtração de LL pelo LP. Assim, o IP obtido foi 11, classificando desta forma o solo como medianamente plástico.

3.1.1.4 Classificação do solo

Comumente, os solos apresentam variada composição granulométrica, contendo partículas de grãos em varias faixas. Um importante sistema de classificação, frequentemente usado no Brasil para determinar o tipo de solo é o sistema de classificação americano – *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Na tabela 3 apresenta-se a classificação AASHTO dos solos que é feita com base na granulometria do solo e em seus resultados nos ensaios dos Limites de Atterberg – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade.

Tabela 3 – Classificação dos solos

Classificação Geral	Materiais Granulares 35% (ou menos) passante na peneira N 200							Materiais Silto-Argilosos				
Classificação em Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Granulometria - % passando na peneira:												
N 10	50 máx.											
N 40	30 máx.	30 máx.	51 min.									
N 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Característica do material passando na peneira N 40:												
Limite Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	41 min.
Índice Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	11 min.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	20 máx.
Materiais Constituintes	Fragmentos de Pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosas				Solos Siltosos		Solos Argilosos		

Fonte: Adaptado pela autora com base em Almeida (2005, p. 114).

Além dos grupos descritos acima se pode acrescentar o tipo A-8, para solos orgânicos – as chamadas turfas – que são materiais de resistência quase nula. Como apresentado na tabela, os grupos A-1, A-2 e A-3 são compostos essencialmente por materiais granulares e os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 por solos finos (ALMEIDA, 2005).

Com base nos ensaios executados (Limites de Atterberg e análise granulométrica), determinou-se de acordo com a tabela de classificação da AASHTO que o solo analisado é um material argiloso da classe A-6.

Ainda, além da classificação pela tabela AASHTO, outro recorrente sistema de classificação utilizado é o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), desenvolvido pela Associação Americana de Teste e Materiais – *American Society For Testing and Materials (ASTM)*.

Então, a partir dos valores obtidos pela Granulometria e pelos Limites de Atterberg, utilizando-se da norma americana D2487-00 (ASTM, 2000) – SUCS, caracterizou-se o solo também como uma argila inorgânica de baixa a média plasticidade (CL).

As argilas apresentam uma variada estrutura química, constituindo-se principalmente de silicato e aluminatos, sendo que suas partículas são predominantemente finas (CAPUTO, 1988). Solos argilosos são pouco permeáveis, ou seja, tendem a reter mais água em sua estrutura e estão mais suscetíveis a instabilidade e deslizamentos (BENTO, 2006; PINTO, 2006).

3.1.1.5 Ensaio de compactação

Após preparação do solo conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016) pesou-se 3 kg de material, que posteriormente foi transferido a uma bandeja metálica. Com auxílio de uma proveta, aos poucos, adicionou-se água enquanto revolia-se o material. Seguidamente, efetuou-se a compactação em três camadas, sendo que cada camada foi compactada com 26 golpes distribuídos uniformemente a energia

normal, como indicado pela NBR 7182 (ABNT, 2016). Na Figura 16, apresenta-se a realização da compactação de uma amostra.

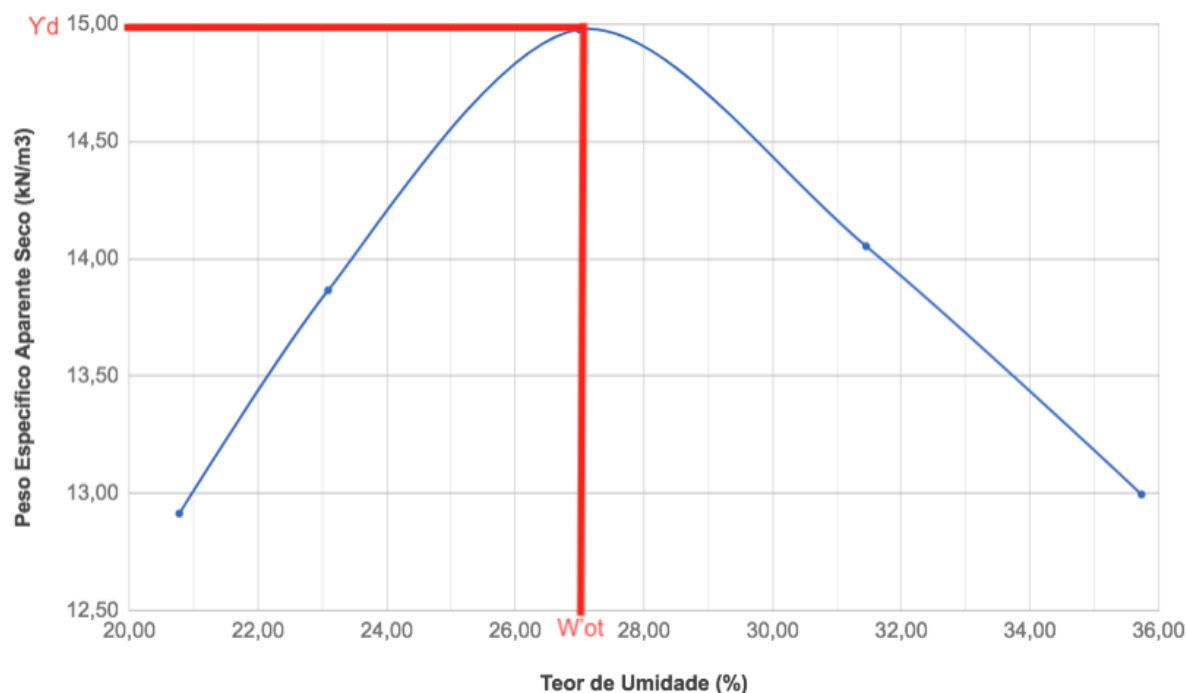
Figura 16 – Compactação de uma amostra



Fonte: Autora (2018).

Esse processo foi feito mais 4 vezes com reaproveitamento do solo e, a cada ponto, aumentou-se em cerca de 3% o teor de umidade da mistura. Com os dados alcançados com o ensaio, construiu-se o gráfico de compactação, exibido na Figura 17.

Figura 17 – Gráfico de compactação



Fonte: Autora (2018).

Como pode ser visto na Figura 17, a umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação do solo utilizado no estudo é de 27% e o peso específico aparente seco máximo é de 15 kN/m³.

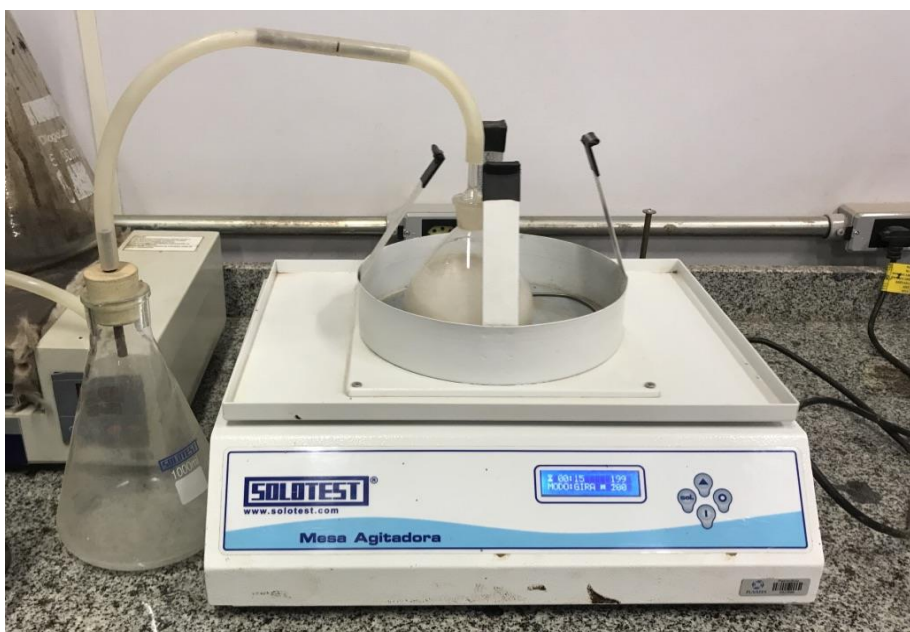
3.1.2 Cal

Para realização do ensaio de pH e de resistência à compressão simples do procedimento experimental utilizou-se a cal dolomítica hidratada CH-II, popularmente conhecida como primor extra e vendida em sacos de 20kg, da marca Dagoberto Barcellos (DB) de Caçapava do Sul – RS.

3.1.2.1 Massa específica real dos grãos

Para determinação da massa específica da cal adotaram-se os mesmos procedimentos anteriormente realizados para a determinação da massa específica do solo apresentado no item 3.1.1.1, conforme indicado pela NBR 6458 (ABNT, 2016).

Figura 18 – Ensaio de massa específica da cal



Fonte: Autora (2018).

Na Figura 18 pode ser observado o picnômetro com cal e água no aparelho de vácuo como especificado pela NBR 6458 (ABNT, 2016). A massa específica da cal encontrada foi de $2,49 \text{ g/cm}^3$.

3.1.3 Cinza Volante

A cinza volante (CV) utilizada para realização do procedimento experimental foi cedida pela empresa Conpasul Construção e Serviços, sendo a cinza de classe

C, proveniente da queima de carvão betuminoso, conforme norma americana C 618 da *American Society for Testing Materials* (ASTM, 2008).

As cinzas resultantes da queima do carvão são caracteristicamente ricas em silicato e aluminato e, quando associadas a cal, geram melhorias na resistência, durabilidade e expansibilidade como mencionado no item 2.4. O material foi disponibilizado em sacos plásticos e armazenado assim até a data de sua utilização.

3.1.3.1 Massa específica real dos grãos

Assim como para o solo e para a cal, realizou-se o ensaio para determinação da massa específica real da cinza, seguindo a mesma metodologia dos itens 3.1.1.1 e 3.1.2.1, em conformidade com a NBR 6458 (ABNT, 2016). A massa específica encontrada no ensaio para a cinza volante foi de 2,23 g/cm³.

3.1.4 Água

Para realização dos ensaios utilizou-se a água disponibilizada no Laboratório de Tecnologia da Construção da Universidade do Vale do Taquari – Univates, proveniente da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

3.2 Dosagem de cal

O método utilizado para determinação do teor de cal da mistura foi o método de pH de Eades e Grim (1966). Amostras de 20 g foram pesadas e reservadas em béqueres de 300 mL, do mesmo modo, diferentes de cal – 2, 4, 6, 8, 10 e 12%, foram disposto em capsulas, evidenciado na Figura 19. Após, misturou-se as amostras de solo e cal.

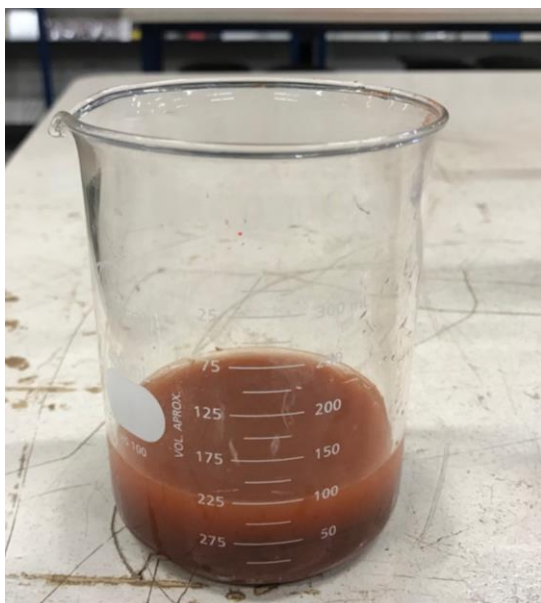
Figura 19 – Amostras ensaiadas



Fonte: Autora (2018).

Os teores de cal adicionados ao solo foram determinados arbitrariamente, em um primeiro momento. Depois de misturado a cal ao solo, adicionou-se 100 mL de água, demonstrado na Figura 19, e a cada 10 minutos, durante 1 hora, agitou-se os béqueres com auxílio de um bastão de vidro por 30 segundos a fim de homogeneizar a mistura.

Figura 20 – Béquer com os materiais homogeneizados



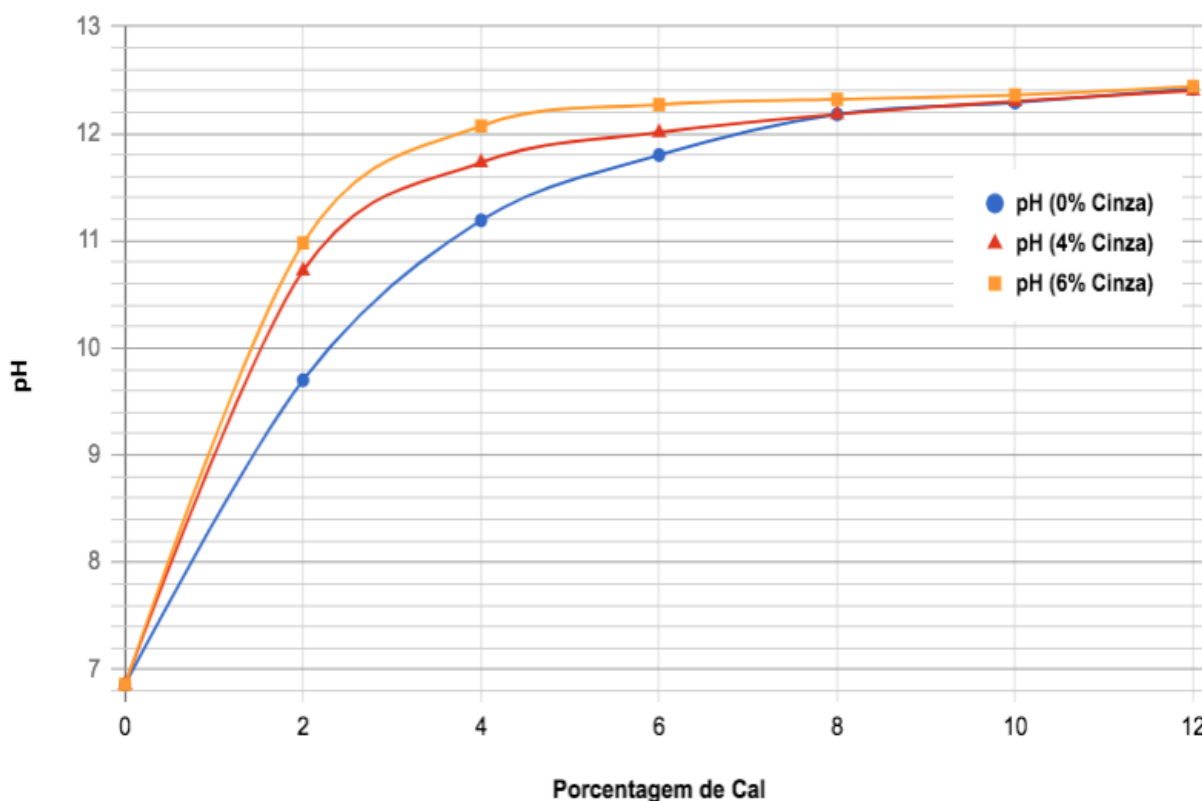
Fonte: Autora (2018).

O objetivo do teste é encontrar a porcentagem mínima de cal necessária para a mistura solo-cal atingir um pH de 12,4 ou maior e manter constante esse pH. Com a adição de 12% de cal, o pH do solo chegou a 12,42, ultrapassando os 12,4 indicado pelo método.

No entanto, como já elucidado anteriormente no item 2.4, a cinza volante potencializa as reações pozalánicas entre o solo e a cal, assim, repetiu-se o ensaio com os teores de 4 e 6% de cinza, cerca de 50% dos maiores teores de cal ensaiados e que atingiram e/ou se aproximaram do objetivo do ensaio, pois de acordo com Leon *et al.* (2015), o teor adequado de cinza volante, para a maior reatividade da mistura cal-solo-cinza, é cerca de 50% do teor da cal.

Isto posto, os teores de cinza volante foram definidos em função dos teores de cal em virtude de não haver métodos de determinação para a porcentagem de cinzas a serem adicionadas ao solo. Na Figura 21 apresenta-se o gráfico do ensaio de pH pela porcentagem de cal utilizada para os três teores de cinza especificados.

Figura 21 – Gráfico de pH pela porcentagem de cal



Fonte: Autora (2018).

Com base no gráfico da Figura 21, definiu-se as porcentagens de cal a ser utilizada no programa experimental (5, 7, 9 e 11 %). Optou-se por essas dosagens devido a pequena variação que houve no pH a partir da amostra com 4% de cal. Ademais, a partir da porcentagem de 5 para as amostras com 4% e 6% de cinza, pode-se perceber que o pH se mantém, aproximadamente, constante.

Segundo Dalla Rosa (2009), a função da cinza volante é agir como a fração fina (argila) do solo, aumentando a reatividade do mesmo a cal, conseqüentemente, diminuindo a porcentagem de cal da mistura. Portanto, para solos argilosos, não há necessidade de utilizar grandes porcentagens de cinza – superior a 8%. Dessa forma, manteve-se os teores de 0, 4 e 6% de cinza volante para o programa experimental.

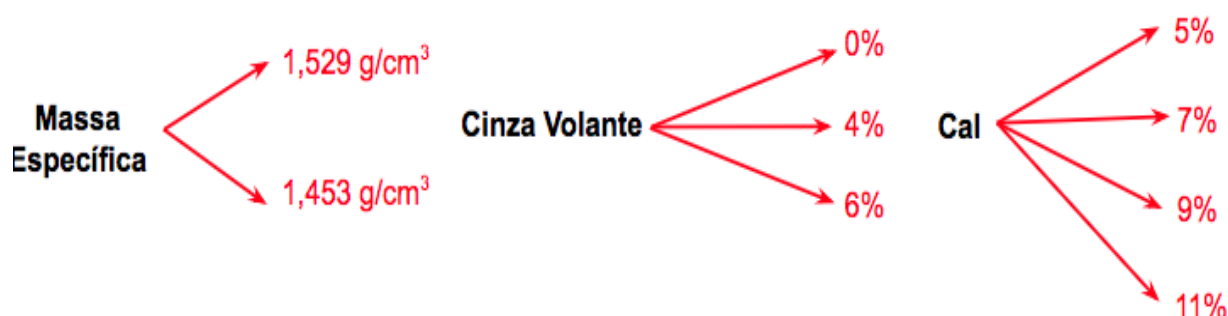
3.3 Programa Experimental

Depois de determinados os teores de cal e de cinza, descrito no item 3.2, definiu-se dois pontos de moldagens. Os CP's do primeiro ponto foram moldados a massa específica aparente máxima de $1,529 \text{ g/cm}^3$ e os do segundo a 95% da massa específica aparente máxima – $1,453 \text{ g/cm}^3$.

Foram moldadas também amostras somente com solo, sem o acréscimo de aditivos, a fim de analisar os efeitos dos aditivos na resistência a compressão simples do solo. Optou-se pelo ensaio de resistência a compressão simples, pois, segundo Dalla Rosa (2009), ensaios de compressão simples são amplamente utilizados em programas experimentais na análise dos efeitos da estabilização com cal devido a sua execução rápida e simples, bem como por sua confiabilidade e baixo custo.

Todos os corpos de prova foram moldados a umidade ótima de 27%, determinada anteriormente pelo ensaio de compactação somente com solo, pois, estudos demonstram que com a associação dos aditivos a variação da umidade da mistura é muito pequena. Na figura 22 apresenta-se a relação entre os teores de cal e cinza volante e as massas específicas.

Figura 22 – Combinação dos Corpos de Prova



Fonte: Autora (2018).

Deste modo a relação apresentada mais as amostras moldadas somente de solo nas duas diferentes massas específicas resultou em 26 combinações ($[2 \times 3 \times 4] + 2$). Para cada diferente teor de material da mistura, montaram-se os corpos de prova em triplicata, devido à dispersão do ensaio, totalizando então, 78 corpos de prova. Ainda, na moldagem, foi atentado para não se moldar os três corpos de prova do mesmo conjunto em um dia, uma vez que, segundo Ribeiro e Ten Caten (2003), essa aleatoriedade diminui a influência de fatores como ruído, temperatura, desgaste das ferramentas e a habilidade e cansaço do operador.

3.3.1 Moldagem e ensaio de resistência à compressão simples

Os procedimentos de secagem ao ar e destorroamento do solo para moldagem dos corpos de prova foram realizados conforme especificado pela NBR 6457 (ABNT, 2016). Todos os materiais foram armazenados em sacos plásticos identificados, até a data de realização dos ensaios.

Os corpos de provas utilizados para os ensaios foram cilindros com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Inicialmente fez-se a pesagem dos materiais – solo, cal, cinza volante e água (FIGURA 23). Em seguida misturou-se a cal e a cinza volante ao solo até a mistura adquirir homogeneidade (cor uniforme). Então, aos poucos, adicionou-se água enquanto continuava-se amolgando a pasta.

Figura 23 – Materiais pesados



Fonte: Autora (2018).

A quantidade de cal utilizada foi determinada em relação a massa de solo seco da mistura para os primeiros pontos de moldagem. Já para as amostras com cinza volante, calculou-se a quantidade de cinza em relação a massa de cal e solo seco, logo, a quantidade de água foi determinada com base nas somas das massas (cal e solo e cal, solo e cinza volante). Calcularam-se as misturas de modo que as amostras fossem suficientes para a moldagem do corpo de prova e para uma sobra para determinação da umidade real.

Moldou-se, então, com auxílio de um macaco hidráulico, as amostras em um molde de ferro fundido tripartido, previamente lubrificado, a moldagem sendo realizada em três camadas. Concluída essa etapa, os corpos de provas foram imediatamente extraídos e sua massa e medidas aferidas (FIGURA 24). Para análise dos resultados foram considerados somente os corpos de prova que apresentavam:

- (I) Grau de compactação entre 99% e 101% do determinado;
- (II) Teor de umidade $\pm 1\%$ do calculado;
- (III) Diâmetro ± 1 mm;
- (IV) Altura ± 2 mm.

Figura 24 – Aferição dos Corpos de Prova



Fonte: Autora (2018).

Após analisados os critérios de aceitação, os corpos de prova foram acondicionados em sacos plásticos devidamente etiquetados, armazenados e curados por 28 dias, como pode-se observar na Figura 25.

Figura 25 – Corpos de Prova acondicionados para a cura



Fonte: Autora (2018).

Para este ensaio fez-se uso de uma prensa de compressão simples, apresentada na Figura 26, com capacidade máxima de carga de 25 toneladas. A velocidade de deformação do ensaio foi de 1,14 mm por minuto, de acordo com a norma americana D5102 (ASTM, 1996).

Figura 26 – Prensa de compressão simples



Fonte: Autora (2018).

3.3.2 Medidas de Sucção

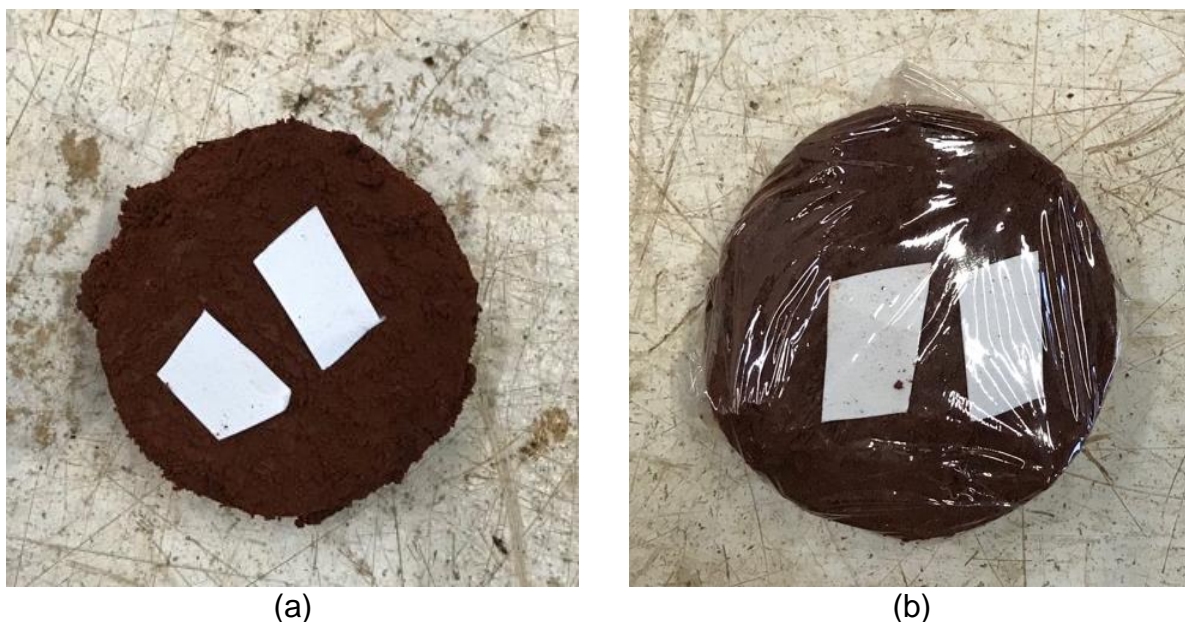
Os corpos de prova em sua umidade de moldagem não se encontravam saturados, como resultado, um certo nível de sucção se fazia presente. Assim, neste trabalho fez-se necessário verificar a magnitude da sucção e se esta manifesta variações relevantes. Para análise da sucção matricial então, utilizou-se a técnica do

papel filtro apresentada por Chandler *et al.* (1992) e usada por Foppa (2005), por Lopes Junior (2007) e por Dalla Rosa (2009).

Após rompido o corpo de prova, uma amostra cilíndrica de mais ou menos 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura era extraída com o auxílio de uma espátula do CP. Ainda, era retirada através de raspagem uma fração de solo para determinação do teor de umidade.

Dois pedaços de papel filtro (Whatman No 42) de aproximadamente 2 cm² eram posicionados na amostra cilíndrica de modo a não ficarem sobrepostos (FIGURA 27a), em seguida, o conjunto (papel filtro + amostra) era embalado com plástico de PVC (FIGURA 27b), identificado e acondicionado em uma caixa de isopor por 7 dias para que fosse alcançado o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro.

Figura 27 – Ensaio Papel Filtro: pedaços de filtro posicionados na amostra (a) e conjunto (amostra + papel filtro) embalado por plástico de PVC (b).



Fonte: Autora (2018).

Passados os 7 dias, os papéis filtro eram removidos das amostras, devidamente dispostos e os dois conjuntos de papel filtro pesados. Tirado o peso úmido de cada conjunto, as capsulas com o filtro eram levadas a estufa de 60°C por

48 horas. Posteriormente, o papel filtro era retirado da estufa para determinação do peso seco de cada conjunto. Com base nos dados obtidos, o teor de umidade de cada papel era medido e a média da umidade dos papeis filtro da amostra calculada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e dos ensaios com o papel filtro, assim como discussões pertinentes a pesquisa desenvolvida e seus objetivos.

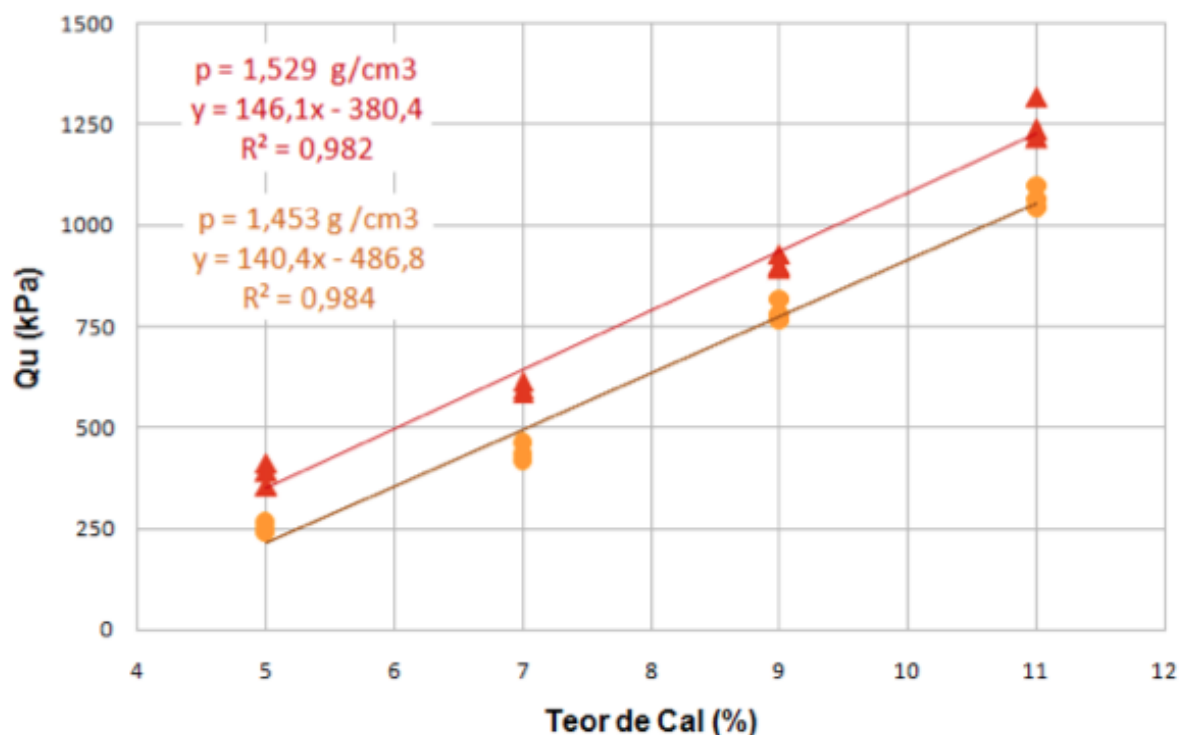
4.1 Resistência a compressão simples

A seguir são apresentados os resultados dos corpos de prova submetidos a compressão simples, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro dos critérios estabelecidos no programa experimental. Ainda, CPs que atingiram resistência superior ou inferior a 10% da média do conjunto foram desprezados e novos corpos de prova moldados.

Os corpos de prova moldados unicamente com solo e imergidos para teste não suportaram a imersão, já os CPs não imersos atingiram, em média, resistências de 80 a 120 kPa as massa específica de 1,453 e 1,529 g/cm³, respectivamente. Nos apêndices A e B são apresentados todos os resultados dos corpos de prova submetidos ao ensaio de RCS.

Na Figura 28, apresenta-se o gráfico correspondente as amostras com 0% de cinza volante. Nele são expostas as resistências alcançadas nos corpos de prova pela porcentagem de cal das misturas.

Figura 28 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras com 0% de Cinza.

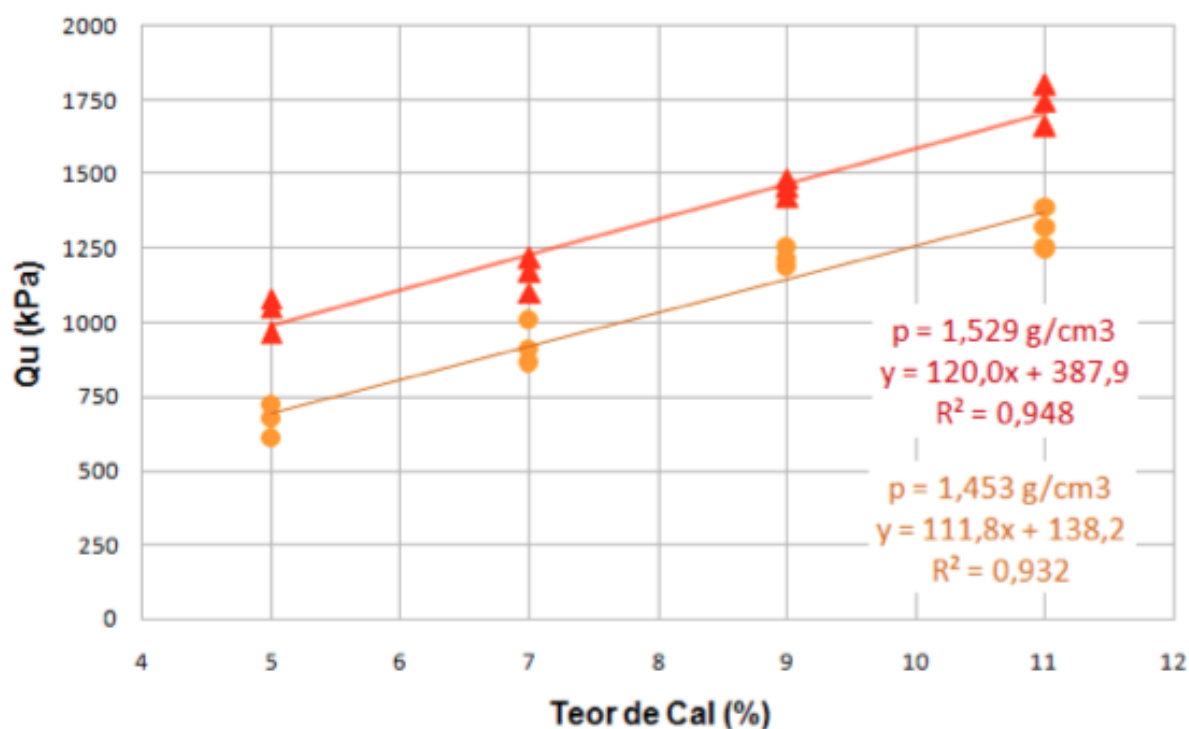


Fonte: Autora (2018).

No gráfico da Figura 28 pode-se notar um acréscimo da resistência a compressão simples com o aumento do teor de cal da mistura, tanto para as amostras moldadas a massa específica aparente máxima ($\rho_{dmáx}$) quanto para as amostras moldadas a 95% de $\rho_{dmáx}$. Da primeira porcentagem de cal ensaiada (5%) para a última (11%) houve um aumento de aproximadamente 850 kPa, mais de 200%. Nas Figuras 29 e 30 são expostos os gráficos gerados a partir das amostras com 4 e 6% de cinza volante, respectivamente.

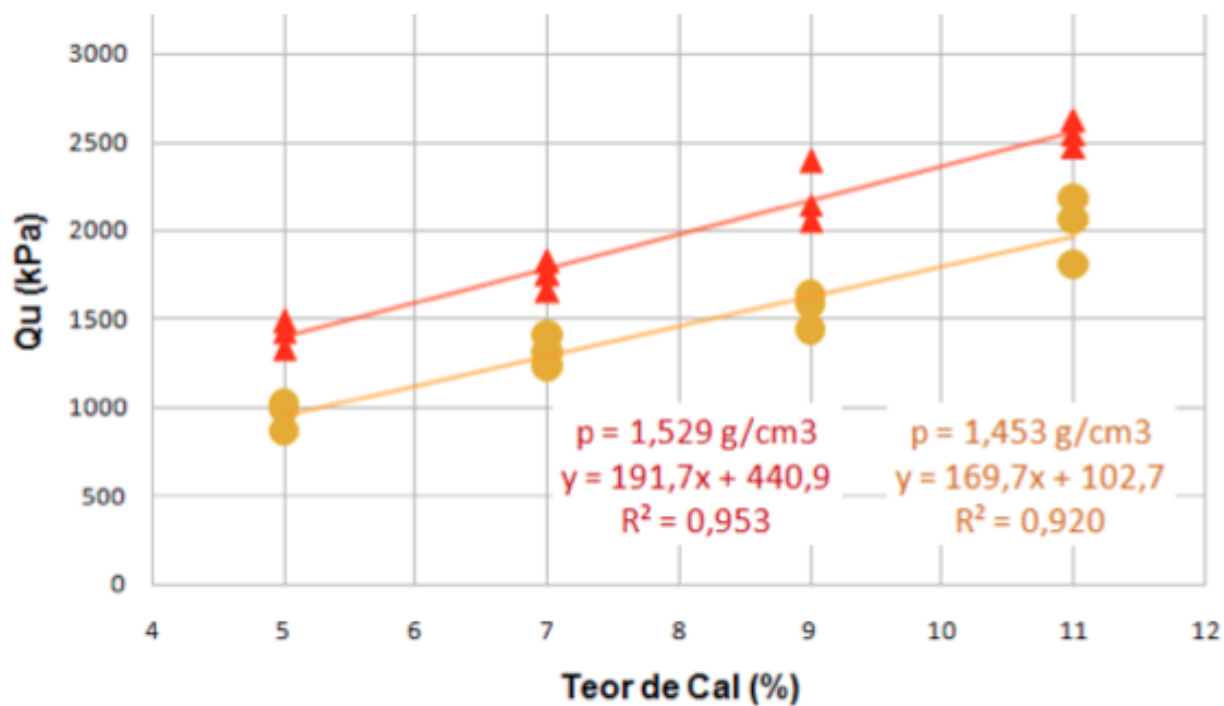
Núñez (1991), Foppa (2005), Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2009) constataram em suas pesquisas que a taxa de crescimento da resistência a compressão simples é linear ao aumento do teor de cal das misturas, fenômeno demonstrado nos gráficos das Figuras 28, 29 e 30. Os autores concluíram ainda que essa taxa é maior nas amostras curadas por 60 e 90 dias, devido as reações pozolânicas entre a cal e a sílica e alumina presente no solo, pois essas reações são caracteristicamente lentas e podem ocorrer durante a anos – enquanto houver hidróxido de cálcio no solo.

Figura 29 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras com 4% de Cinza.



Fonte: Autora (2018).

Figura 30 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras com 6% de Cinza.

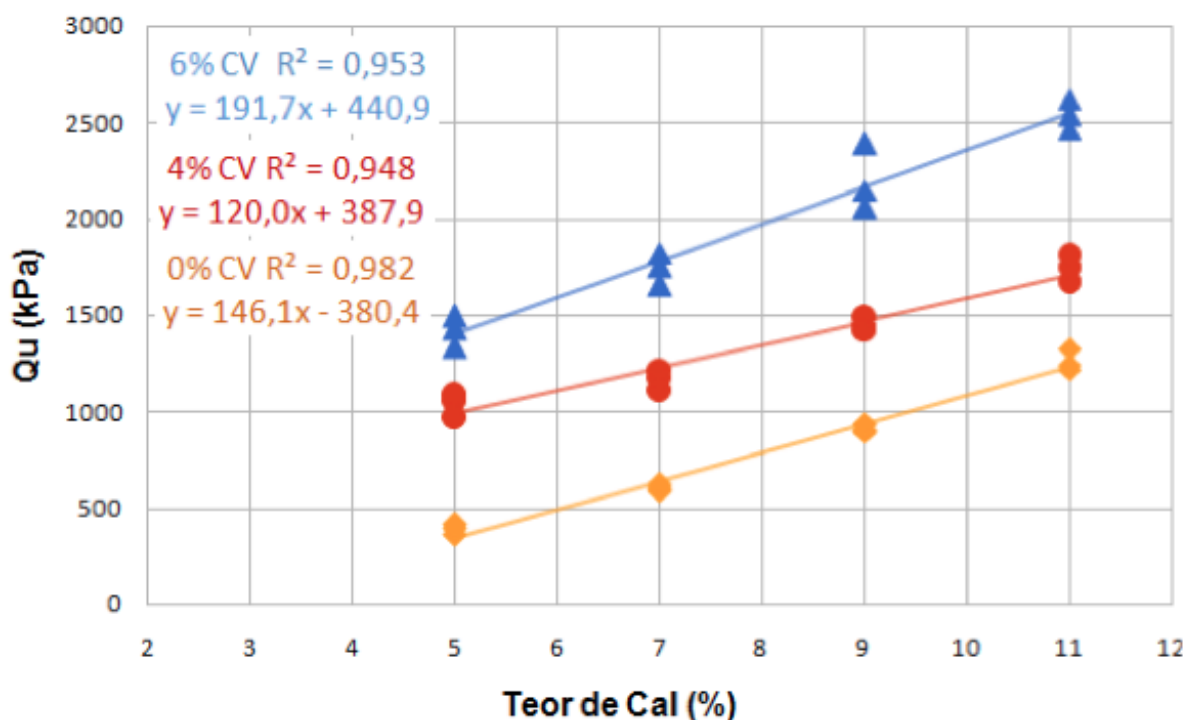


Fonte: Autora (2018).

A partir dos gráficos evidenciados nas Figuras 29 e 30 algumas particularidades importantes do comportamento do solo-cinza-cal são destacadas. As amostras moldadas a massa específica aparente seca máxima obtiveram resistências superiores as moldadas abaixo da mesma indicando que com o aumento da massa específica aparente seca do solo há uma melhora na efetividade do agente cimentante utilizado para a estabilização, como já destacado por Nuñez (1991) e Lopes Junior (2007).

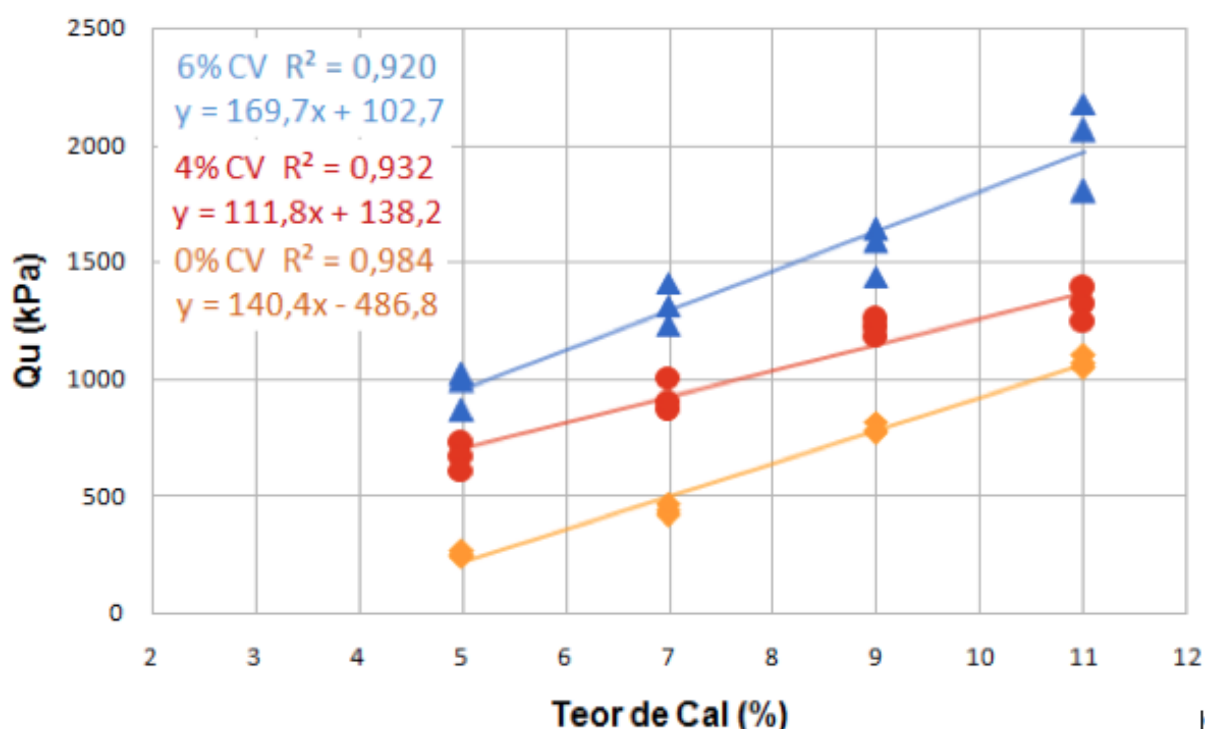
Ainda, com o aumento da porcentagem de cinza adicionada ao solo houve alterações positivas nas resistências do CPs indicando uma boa interação entre a cinza volante, a cal, a água e o solo, fato constado também anteriormente por Dalla Rosa (2009). Essas alterações podem ser melhor observadas nas Figuras 31 e 32 onde são expostos os gráficos gerados a partir das amostras moldadas a massa específica aparente seca máxima e a 95% de $\rho_{dm\acute{a}x} = 1,529$ e $1,453 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Figura 31 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras moldadas a massa específica de $1,529 \text{ g/cm}^3$.



Fonte: Autora (2018).

Figura 32 – Gráfico da resistência a compressão simples x teor de cal das amostras moldadas a massa específica de 1,453 g/cm³.



Fonte: Autora (2018).

Ademais, tanto no gráfico da Figura 31 quanto no gráfico da Figura 32 verifica-se um aumento de cerca de 40% da resistência das amostras com 4% de cinza para as com 6% de cinza para o teor de 5% de cal, no entanto, quando verificado as amostras moldadas com 11% de cal para as porcentagens de 4 e 6% de CV nota-se um acréscimo de, aproximadamente, 50% podendo indicar que o solo analisado segue a tendência encontrada por Leon *et al.* (2015) para um solo fino argiloso laterítico, que estabelece o teor adequado da cinza volante como 50% do teor da cal.

Na Tabela 4 são manifestadas as médias dos ganhos de resistência alcançados entre os corpos de prova moldados somente com solo e os com 5% de cal para os teores de 0, 4% e 6% de cinza.

Tabela 4 – Variação da resistência entre os CPs com solo puro e os com adição de 5% de Ca.

CV (%)	Massa específica	Resistência Inicial (kPa)	Resistência com 5% de cal (kPa)	Variação (%)
0	1,529	118	388	228
	1,453	71	251	255
4	1,529	118	1034	774
	1,453	71	670	848
6	1,529	118	1416	1097
	1,453	71	959	1259

Fonte: Autora (2018).

Ainda, na tabela 5 apresenta-se as médias dos ganhos de resistência alcançados pelos corpos de prova somente com solo também, mas a comparação da resistência é feita em relação aos CPs moldados com 11% de cal para os teores de 0, 4% e 6% de CV.

Tabela 5 – Variação da resistência entre os CPs com solo puro e os com adição de 11% de Ca.

CV (%)	Massa específica	Resistência Inicial (kPa)	Resistência com 11% de cal (kPa)	Variação (%)
0	1,529	118	1260	964
	1,453	71	1070	1415
4	1,529	118	1738	1368
	1,453	71	1318	1767
6	1,529	118	2544	2050
	1,453	71	2013	2750

Fonte: Autora (2018).

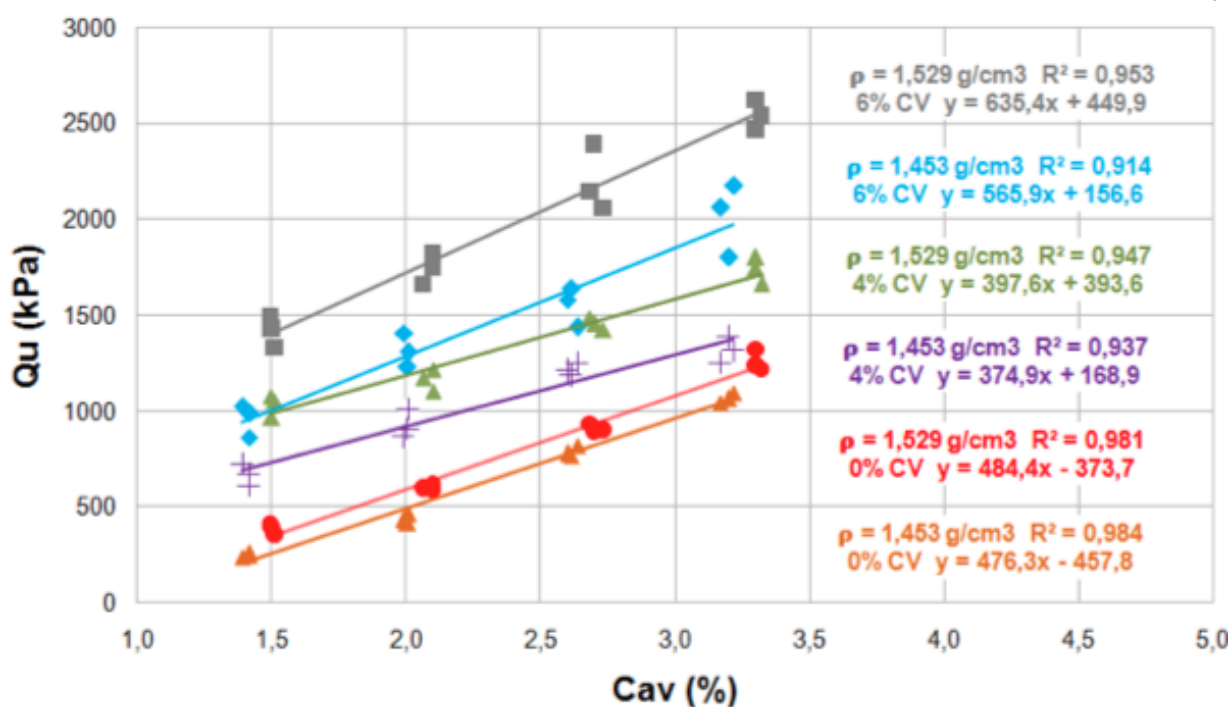
As tabelas 4 e 5 evidenciam aumentos de mais de 200% já para a adição de 5% de cal sem cinza volante para os CPs moldados a $p_{dm\acute{a}x}$, associando-se 4% de cinza esse acréscimo vai para cerca de 750%, que expressa um aumento de

aproximadamente 1000kPa. Esses resultados demonstram que o solo estudado manifesta boa interação com a cal e que essa, pode ser ampliada com a adição de cinza volante afim de obter-se resistências mais elevadas.

4.1.1 Efeito do teor de cal e da porosidade

Aumentos de resistência com o aumento de cal e diminuição da porosidade são mencionados em diversos trabalhos consultados (INGLES; METCALF, 1972; NÚÑEZ, 1994; LOPES JUNIOR, 2007). Aspectos importantes a serem considerados na análise da resistência a compressão simples são: teor volumétrico da cal (volume de cal dividido pelo volume total do corpo de prova) e porosidade, fatores esses que influenciam no contato entre as partículas existentes, assim, na Figura 33, apresenta-se o gráfico com a variação da resistência a compressão simples com o aumento do teor volumétrico da cal (C_{av}) para as amostras ensaiadas.

Figura 33 – Gráfico do efeito do teor de cal (volumétrico) sobre a resistência a compressão simples.

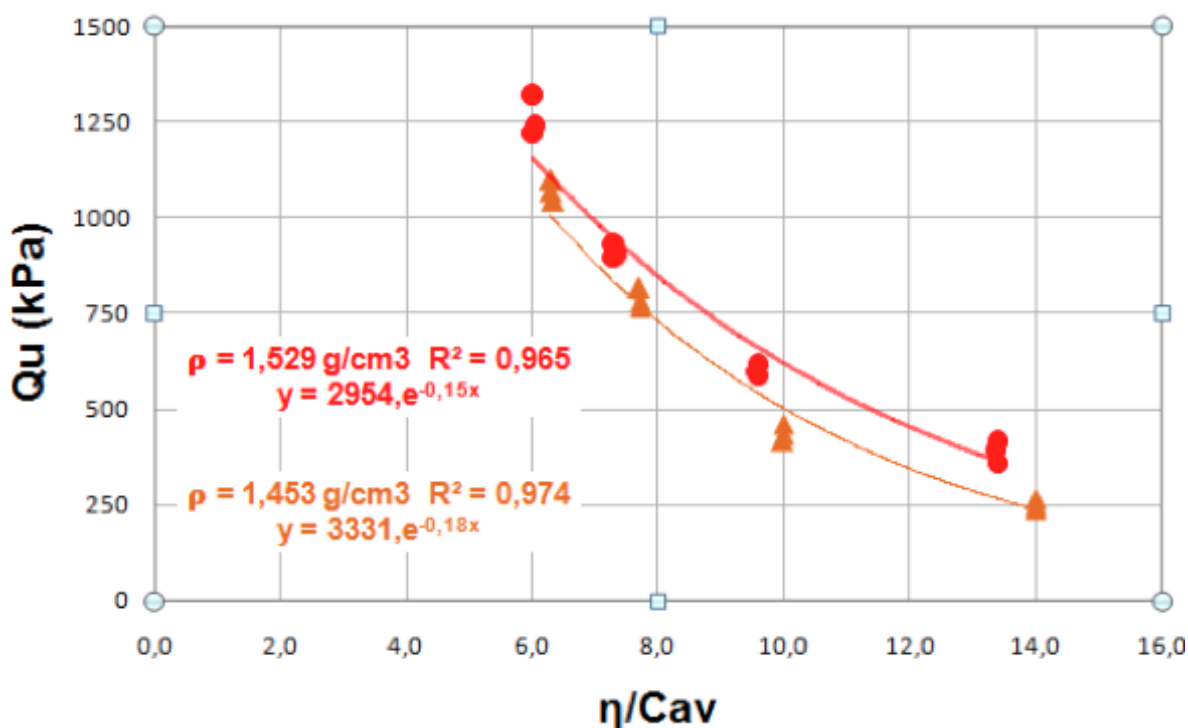


Fonte: Autora (2018).

Com o aumento do teor de cal por unidade de volume do corpo de prova, pode-se constatar, com base na Figura 33, aumento na resistência a compressão simples. Ainda, é perceptível que a massa específica aparente seca influi no teor volumétrico de cal e, conseqüentemente, na resistência, confirmando que uma parcela do aumento da resistência pela redução da porosidade ocorre pelo acréscimo de cal. Entretanto, pode-se observar também que, mantendo-se o teor de cal, mas variando a porcentagem de cinza há aumento na resistência.

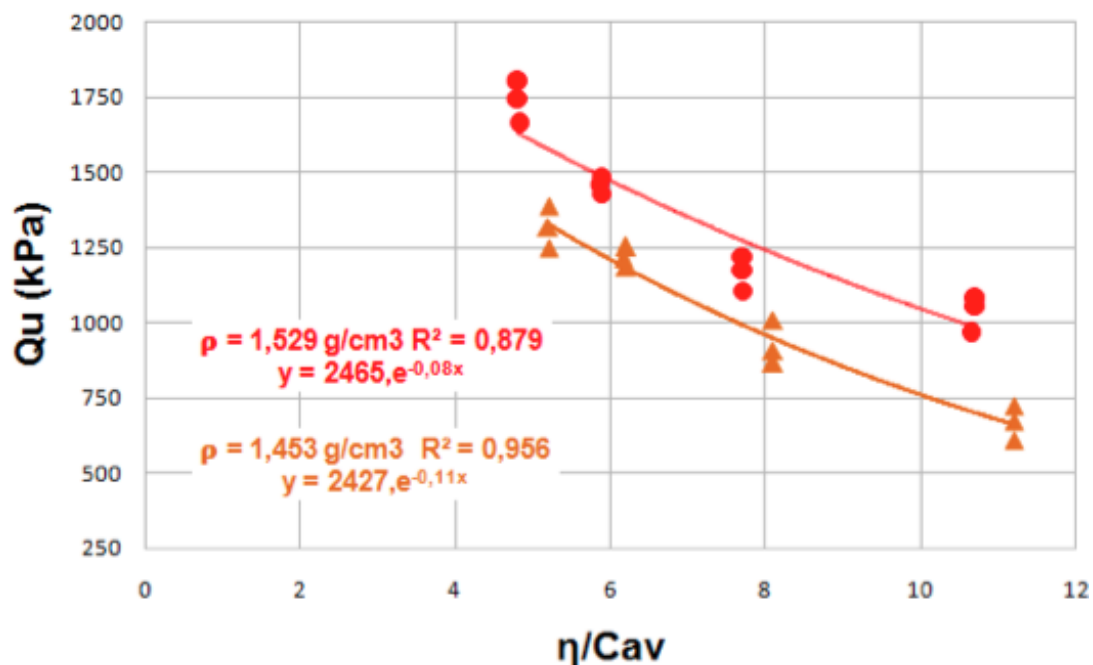
Nas Figuras 34, 35 e 36 são apresentados os gráficos referentes a influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 0, 4 e 6% de cinza volante, respectivamente.

Figura 34 – Gráfico da influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 0% de CV.



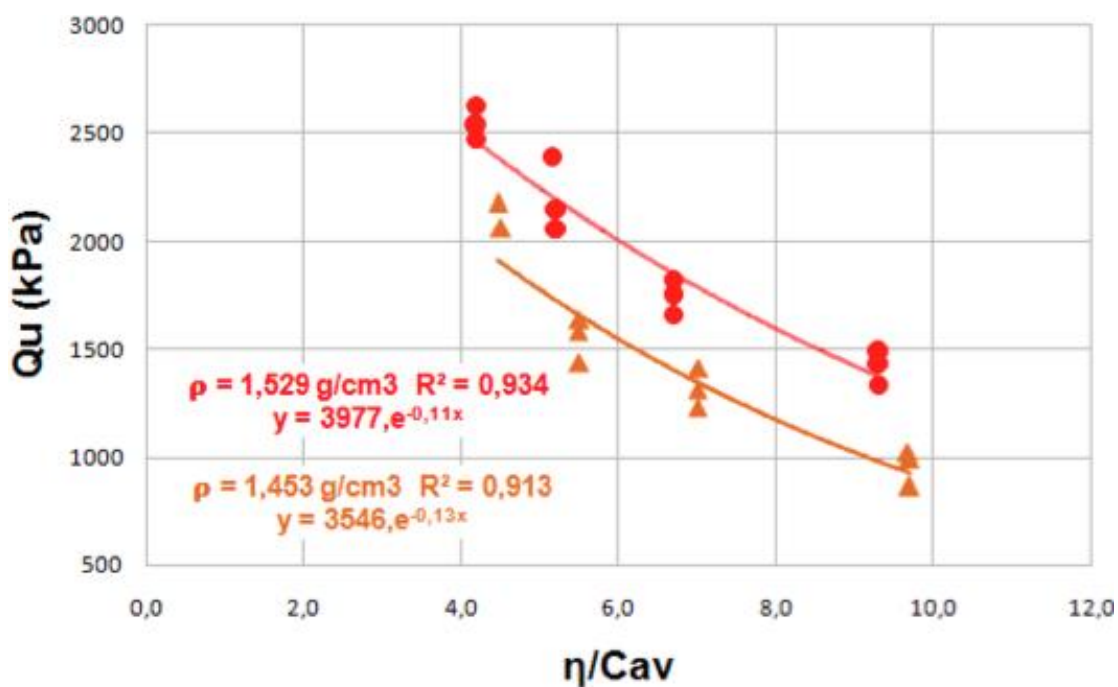
Fonte: Autora (2018).

Figura 35 – Gráfico da influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 4% de CV.



Fonte: Autora (2018).

Figura 36 – Gráfico da influência da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal sobre a resistência a compressão simples para as amostras com 6% de CV.



Fonte: Autora (2018).

A partir dos gráficos expostos nas Figuras 34, 35 e 36, constata-se que a redução do número de vazios e, conseqüentemente, da porosidade pelo acréscimo de cal e cinza volante ocasiona melhorias exponenciais na resistência das misturas. Além disso, observa-se também que, independente da quantidade de cal e cinza volante, a redução na porosidade acarreta no aumento da resistência a compressão simples.

Ademais, Lopes Junior (2007) apurou que quanto maior a massa específica aparente seca das misturas maior a efetividade do aditivo cimentante e, por conseguinte, maior a resistência. Ainda, segundo ao autor, isso ocorre pelo maior contato e intertravamento entre as partículas devido a redução do número de vazios.

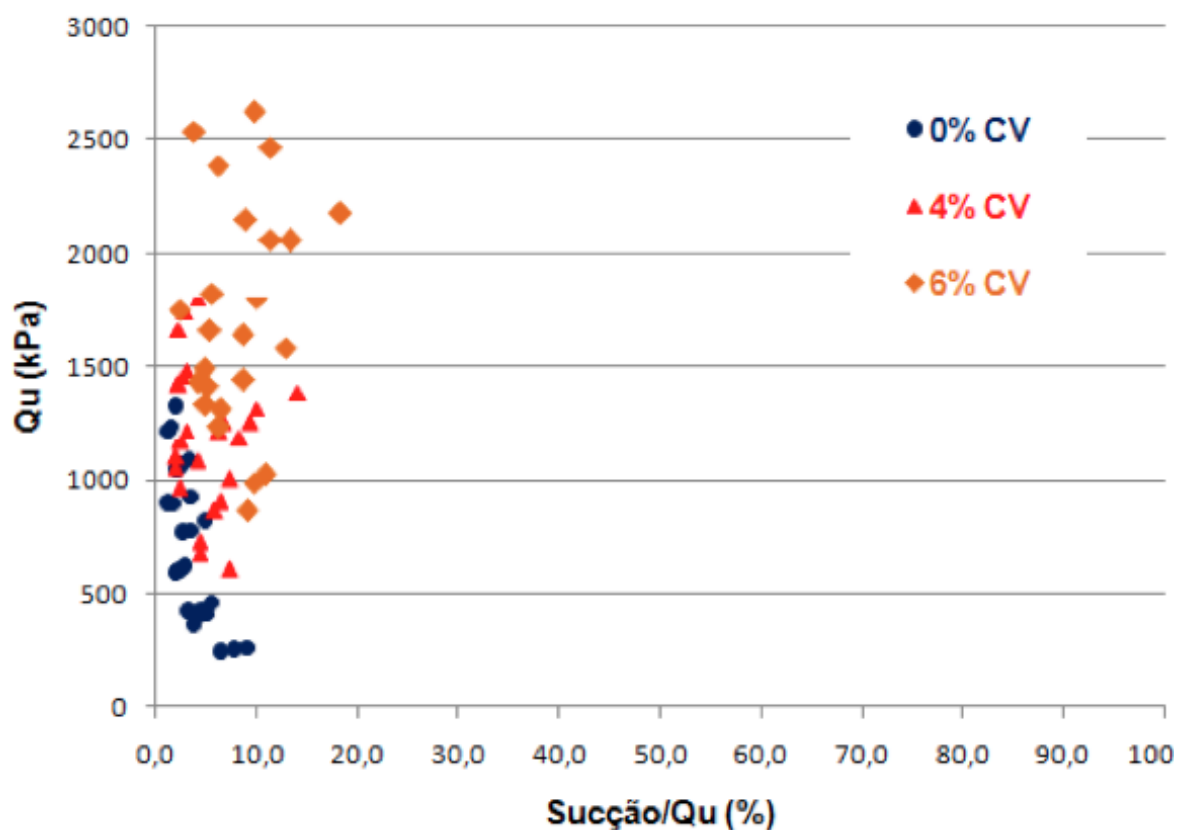
4.2 Medidas de Sucção Matricial

De acordo com o ambiente ao qual exposto o solo pode vir a perder ou absorver água, aumentando ou reduzindo o grau de saturação, esse fenômeno é chamado de sucção e pode vir a interferir nos resultados do ensaio de compressão simples.

De acordo com Marinho e Silva e Cruz, citados por Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2009), solos com grau de compactação entre 70 e 90% possuem caracteristicamente valores de sucção compreendidos entre 0 kPa e 1000 kPa, enquanto para solos compactados no teor ótimo de umidade valores de 50 kPa a 300 kPa são esperados. Assim, no Apêndices C e D são apresentados os valores de sucção encontrados para todos os corpos de prova rompidos e analisados na presente pesquisa.

Na Figura 37, apresenta-se a variação da resistência pela relação entre a sucção e a resistência a compressão simples. Em função da não imersão dos corpos de prova, valores inesperados eram prováveis, no entanto, em grande parte dos corpos de prova a sucção não passou de 10% da resistência a compressão simples, ademais, nos CPs que a sucção ultrapassou 10% da resistência ela não excedeu 20%.

Figura 37 – Gráfico da influência da sucção nos valores de resistência a compressão simples para os corpos de prova ensaiados.



Fonte: Autora (2018).

De modo geral, grandes variações de sucção não foram constatadas, possibilitando assim, desconsiderar a sucção nas análises dos ensaios de resistência a compressão simples.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por último, neste capítulo são expostas considerações finais, dentro das condições e dos limites deste estudo, acerca dos resultados obtidos com o ensaio de resistência mecânica desenvolvido para amostras de um solo argiloso, considerando os fatores controláveis – quantidade de cal, quantidade de cinza volante e porosidade, além de sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Como resultado da pesquisa realizada foi possível aprofundar conhecimentos a respeito da estabilização de solos como uma alternativa para utilização do material natural, mesmo quando este é inadequado para as especificações de projeto. Ademais, apurou-se a viabilidade da incorporação de cal e de cinza volante ao solo de Bom Retiro do Sul para acrescer resistência ao mesmo.

Ainda, parâmetros como: o teor de cal, o teor de cinza, a compactação e a porosidade mostraram influenciar nos resultados de resistência a compressão simples, o que corrobora com a necessidade de analisar-se as características do solo e os teores de aditivos a serem utilizados.

O método de pH de Eades e Grim (1966) mostrou-se eficiente para determinação da dosagem, apesar do solo atingir pH superior a 12,4 somente com

12% de cal, com o ensaio ficou fácil visualizar a estabilização do pH a partir do teor de 5%, neste sentido, a associação da cinza volante ao solo para realização do ensaio provou-se relevante, pois essa tendência foi realçada nas amostras com 4 e 6% de cinza.

No que diz respeito a influência da quantidade de cal, verificou-se que a cal tem efeito sobre a resistência a compressão simples, sendo que o aumento da resistência, na faixa dos teores estudados (5% a 11%), é linear ao aumento da quantidade de cal da mistura. Inclusive pequenas adições de cal geram aumentos de mais de 200% na resistência, o que demonstra a eficiência do aditivo para o solo de Bom Retiro do Sul.

Em relação a cinza volante, houve aumento da resistência do solo a compressão com a sua adição, devido as propriedades pozolânicas da mesma, que é composta, basicamente, por sílica e alumina o que, por conseguinte, origina aumento da resistência. No entanto, a partir dos resultados alcançados na presente pesquisa não foi possível observar uma linearidade no aumento da resistência com o aumento da CV, como constatado com a cal, isso pode indicar que a tendência apresentada por Leon et al (2015), onde a quantidade ideal de CV encontrada para um solo fino argiloso foi cerca de 50% do teor de cal, é verdadeira para o solo estudado na presente pesquisa.

Ainda, as amostras moldadas a massa específica aparente seca máxima apresentaram resistências superiores as moldadas a 95% de $\rho_{dm\acute{a}x}$, assim como as amostras com teores maiores de cal e cinza exibiram RCS melhores que as com teores menores, indicando que o teor volumétrico de cal e cinza volante tem relação com a porosidade.

Com o aumento do teor volumétrico notou-se redução na porosidade e, como resultado, aumento exponencial na resistência. Acréscimos de, aproximadamente, 4% na porosidade geraram reduções de mais de 50% na resistência. Isso se dá pelo intertravamento das partículas que ocorre devido ao maior contato entre os materiais, gerando então, uma cimentação mais efetiva. Além disso, a mobilização do atrito no interior da amostra e a distribuição das tensões pode ter contribuído para o ganho de resistência.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

É interessante estender esse trabalho a outras averiguações, tanto em tecnologia quanto em pesquisa básica. Dessa forma, sugere-se para novos estudos:

- I) Analisar a utilização de outros métodos de dosagem para determinação dos teores de cal e cinza volante adequados para a estabilização do solo de Bom Retiro do Sul.
- II) Investigar a proporção de cinza volante para cal mais satisfatória para a maior reatividade dos aditivos com o solo a fim de, como resultado, obter um maior ganho de resistência.
- III) Pesquisar e avaliar tecnicamente novos métodos e materiais para utilização em geotecnia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures**. Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2487-00: Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. West Conshohocken, PA, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2487-00 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. Philadelphia, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502. Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181. Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Juiz de Fora: Departamento de Transportes – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

AZEVEDO, André Luis Cairo de. **Estabilização de Solos com Adição de Cal – Um estudo sobre as reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H. B.; MUNTOHAR A. S. Stabilization of residual soil with rice rusk ash and cement. **Construction and Building Materials**. Ed. 19, p. 448-453, 2005.

BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**. Ed. 42. p. 223-237, jan. de 1996.

BENTO, Priscila Fiochi. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Geotécnica, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2006.

BORGES, R. A.; SILVEIRA, L. R. Uso de materiais alternativos para melhoria de solo na pavimentação de vias. **Engineering and Science**. Ed. 5, Vol, 01, jun. de 2016.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. p. 425-438, Setembro de 2017.

CAPUTO H.P. **Mecânica de solos e suas aplicações – Fundamentos**. Vol. 1, 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, José M. A. **Mecânica de solos e suas aplicações – Fundamentos**. Vol. 1, 7 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015.

CESSA, Raphael Maia Aveiro; CELI, Luisella; VITORINO, Antônio Carlos Tadeu; NOVELINO, José Oscar; BARBERIS, Elisabetta. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, n.5, pp.1153-1162, 2009.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Boletim Estatístico: Janeiro de 2018**. Disponível em: <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO%202018/Boletim%20Estat%20C3%ADstico%20-%2001%20-%202018.pdf>. Acesso em: 13 de maio de 2018.

CORRÊA, J. F. **Avaliações das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CORRÊA, Juliana F; MARCON, Antônio M; TRICHES, Glicério. **Melhoria das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal.** In: Congresso de Infraestrutura de Transportes (CONINFRA) 2009. São Paulo. Disponível em: <<http://rodoviasverdes.ufsc.br/files/2010/03/MELHORIAS-DAS-PROPRIEDADES-F%C3%80SICAS-E-MEC%C3%82NICAS-DE-SOLOS-ORIGINADOS-DE-ROCHAS-SEDIMENTARES-PELA-ADI%C3%87%C3%83O-DE-CAL.pdf>>. Acesso em: 12 Abr. 2018.

CRAIG, R. F.; KNAPPETT, J. A. **Craig Mecânica dos Solos.** 8 ed. [Reimpr.] Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2018.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization. **Highway Research Record.** Ed. 92, p. 83-102, 1965.

DIEMER, Francielle; RAMBO, Dimas; SPECHT, Luciano P.; POZZOBON, Cristina E. Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.12, p.25-36, Outubro, 2008.

DEGIRMENCI, Nurhayat; OKUCU, Arzu; TURABI, Ayse. Application of phospogypsum in soil stabilization. **Building and Environment.** Vol. 42, Issue 9, pp 3393-3398, september 2007.

EADES, J.L.; GRIM, R.E. **Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization.** High. Res. Board, Bull. 262, Washington, DC, p. 51-63, 1960.

EADES, J.L.; GRIM, R.E. **A quicktestto determine lime requirements for lime stabilization.** In: Highway Research Record, Washington, D.C., n. 139, p.61-72, 1966.

FLEURY, Paulo Fernando. **Gestão Estratégicado Transporte.** ILOS, Brasil, set. 2002.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados.** 2005. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GEIPOT. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – Sistemas de informações técnicas em transportes. **Anuário Estatístico de transportes.** 2002.

GOULARTE, Cristina Lemos; PEDREIRA, Celso Luis da Silva. Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento. In: V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. **Anais GEORS-2009**. Pelotas, 2009.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-soil Mixtures**. Washington, D.C.: Highway Research Board Bulletin, v. 304, p.99-121, 1961.

INGLES, O. G.; METCALF, J.B. **Soil Stabilization: principles and practices**. Sydney: Butterworths, 1972.

JACINTO, E. C.; GUIMARÃES, R. C.; CARVALHO, J. C.; FARIAS, M. M. Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens. In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. **Anais Tema 97: Inovações Tecnológicas e Pesquisas no Projeto e na Construção de Barragens**. Goiânia, 2005.

KOWALSKI, T. E.; STARRY, D. W.; AMERICA, J.W. **Modern Soil Stabilization Techniques**. In: Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Saskatoon, Saskatchewan, October, 2007. Disponível em: <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2007/docs/s8/starry.pdf>. Acesso em 17 de abr. 2018.

LEON, Helena B.; THOMAS, Maurício; BICA, Bruno O.; BUDNY, Jaelson. Determinação de dosagens para a estabilização de um solo laterítico através do método físico-químico. In: VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Universidade Federal do Pampa. **Anais do VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Universidade Federal do Pampa**. Bagé, 2015.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MALLMANN, José E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 243 p.

NAKAMURA, Juliana. Reforço por injeção de cimento. **Revista Infraestrutura Urbana: projetos, custos e construção**, São Paulo, 12 ed., dezembro de 2011. Disponível em: <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/12/reforco-por-injecao-de-cimento-tecnica-de-jet-grouting-250955-1.aspx>. Acesso em: 8 de abr. 2018.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA). **Lime treated soil construction manual**:

lime stabilization & lime modification. 2004. Disponível em: https://www.graymont.com/sites/default/files/pdf/tech_paper/lime_treated_soil_construction_manual.pdf. Acesso em: 30 de abr. 2018.

NÚÑEZ, Washington Peres. **Estabilização físico-química de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OTOKO, George Rowland. A review of the stabilization of problematic soils. **International Journal of Engineering and Technology Research**, Vol. 2, No. 5, May 2014, p. 1 – 6.

PAULA, Thaís Martins de. **Melhoramento de Solos: Adição de cimento, microssílica e cinza de casca de arroz em um silte orgânico.** 2013. 79 f. Monografia – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, S.; PREUSSLER,. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** Rio de Janeiro: Editora Copiarte. 2002. 259 p.

PRIETTO, Pedro Domingues Marques. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado.** 1996. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

RIBEIRO, J. L.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

RIGOLON, Francisco José Zagari. O Investimento em Infraestrutura e a Retomada do Crescimento Econômico Sustentado. **Pesquisa Planejamento Econômico**, Rio de Janeiro, n. 28, vol. 1, p. 129-158, 1998.

SILVA, Cláudia Claumann. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** 2007. 170 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

THOMÉ, Antônio. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais.** 1994. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

VENDRUSCOLO, Márcio Antônio. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado.** 1996. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

VENDRUSCOLO, Márcio Antônio. **Estudo do Comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** 2003. 224 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Resistência a compressão simples dos CPs ensaiados
(Amostras moldadas a massa de 1,529 g/cm³)

CP	CV (%)	Cal (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (m)	Força (kgf)	Qu (kPa)
T 3.1	0	5	50,18	100,92	0,002	72	357
T 3.2	0	5	50,77	100,85	0,002	81	392
T 3.3	0	5	50,32	100,97	0,002	84	414
T 5.1	0	7	49,9	101,2	0,002	117	587
T 5.2	0	7	50,5	100,98	0,002	122	597
T 5.3	0	7	50,74	101,22	0,002	127	616
T 7.1	0	9	49,72	100,86	0,002	177	894
T 7.2	0	9	50,33	100,11	0,002	183	902
T 7.3	0	9	50,52	100,29	0,002	190	930
T 9.1	0	11	50,19	100,98	0,002	246	1219
T 9.2	0	11	50,6	101,11	0,002	254	1239
T 9.3	0	11	50,15	100,3	0,002	266	1321
T 11.1	4	5	50,73	100,01	0,002	217	1053
T 11.2	4	5	50,41	101,22	0,002	197	968
T 11.3	4	5	49,93	101,26	0,002	216	1082
T 13.1	4	7	50,47	101,62	0,002	225	1103
T 13.2	4	7	50,44	101,01	0,002	239	1173
T 13.3	4	7	50,69	101,24	0,002	251	1220
T 15.1	4	9	50,12	100,61	0,002	293	1456
T 15.2	4	9	50,23	100,69	0,002	288	1425
T 15.3	4	9	49,96	100,98	0,002	297	1486
T 17.1	4	11	50,21	100,22	0,002	336	1664
T 17.2	4	11	50,33	101,09	0,002	354	1745
T 17.3	4	11	50,68	100,19	0,002	371	1804
T 19.1	6	5	50,16	100,99	0,002	268	1330
T 19.2	6	5	50,43	101,6	0,002	291	1429
T 19.3	6	5	50,22	100,4	0,002	301	1490
T 21.1	6	7	50,59	100,6	0,002	359	1751
T 21.2	6	7	50,46	101,53	0,002	338	1657
T 21.3	6	7	50,49	100,5	0,002	372	1822
T 23.1	6	9	49,91	100,77	0,002	477	2391
T 23.2	6	9	50,08	101,43	0,002	413	2056
T 23.3	6	9	50,66	100,92	0,002	441	2146
T 25.1	6	11	50,03	99,56	0,002	509	2539
T 25.2	6	11	50,19	100,03	0,002	498	2468
T 25.3	6	11	50,18	101,14	0,002	529	2623

APÊNDICE B – Resistência a compressão simples dos CPs ensaiados
(Amostras moldadas a massa de 1,453 g/cm³)

CP	CV (%)	Cal (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (m)	Força (kgf)	Qu (kPa)
T 4.1	0	5	50,64	100,94	0,002	49	239
T 4.2	0	5	50,48	100,7	0,002	54	265
T 4.3	0	5	50,62	100,02	0,002	51	249
T 6.1	0	7	50,34	100,92	0,002	88	434
T 6.2	0	7	50,17	101,24	0,002	84	417
T 6.3	0	7	50,4	100,27	0,002	94	462
T 8.1	0	9	50,14	100,94	0,002	157	780
T 8.2	0	9	49,92	101,11	0,002	163	817
T 8.3	0	9	50,09	100,85	0,002	154	766
T 10.1	0	11	50,01	100,78	0,002	220	1098
T 10.2	0	11	50,22	100,71	0,002	211	1045
T 10.3	0	11	50,4	100,93	0,002	217	1067
T 12.1	4	5	50,67	100,77	0,002	149	725
T 12.2	4	5	50,36	100,11	0,002	137	674
T 12.3	4	5	50,57	99,96	0,002	125	610
T 14.1	4	7	50,52	100,84	0,002	177	866
T 14.2	4	7	50,34	101,93	0,002	184	907
T 14.3	4	7	50,54	101,42	0,002	206	1007
T 16.1	4	9	50,08	100,89	0,002	244	1215
T 16.2	4	9	50,14	100,32	0,002	252	1252
T 16.3	4	9	49,93	101,76	0,002	237	1187
T 18.1	4	11	50,3	101,4	0,002	267	1318
T 18.2	4	11	50,85	101,77	0,002	259	1251
T 18.3	4	11	50,74	101,83	0,002	286	1387
T 20.1	6	5	50,410	100,870	0,002	208	1022
T 20.2	6	5	50,400	99,150	0,002	176	865
T 20.3	6	5	50,070	99,450	0,002	199	991
T 22.1	6	7	50,660	101,950	0,002	290	1411
T 22.2	6	7	50,230	101,070	0,002	249	1232
T 22.3	6	7	49,860	101,190	0,002	261	1311
T 24.1	6	9	50,380	101,340	0,002	322	1584
T 24.2	6	9	50,420	100,910	0,002	293	1439
T 24.3	6	9	50,510	101,660	0,002	335	1640
T 26.1	6	11	50,480	101,010	0,002	444	2176
T 26.2	6	11	50,440	100,740	0,002	420	2061
T 26.3	6	11	50,440	100,220	0,002	367	1801

APÊNDICE C – Dados gerais dos CPS ensaiados a compressão simples e analisados quanto a sucção (Amostras moldadas a massa de 1,529 g/cm³)

CP	CV (%)	Cal (%)	Qu	Umidade Moldagem	Umidade Rompimento	Sucção (kPa)	Sucção/Qu (%)
T 3.1	0	5	357	27,13	28,04	13	3,6
T 3.2	0	5	392	26,59	27,68	15	3,8
T 3.3	0	5	414	27,05	27,86	21	5,1
T 5.1	0	7	587	27,62	29,43	11	1,9
T 5.2	0	7	597	27,92	29,04	14	2,3
T 5.3	0	7	616	26,54	29,60	17	2,8
T 7.1	0	9	894	27,44	28,52	12	1,3
T 7.2	0	9	902	26,49	28,95	15	1,7
T 7.3	0	9	930	26,95	28,84	33	3,6
T 9.1	0	11	1219	26,98	28,60	15	1,2
T 9.2	0	11	1239	27,55	25,39	17	1,4
T 9.3	0	11	1321	27,00	24,59	24	1,8
T 11.1	4	5	1053	26,69	23,37	19	1,8
T 11.2	4	5	968	27,13	22,80	22	2,3
T 11.3	4	5	1082	27,24	22,62	44	4,1
T 13.1	4	7	1103	27,91	24,65	21	1,9
T 13.2	4	7	1173	26,74	24,53	28	2,4
T 13.3	4	7	1220	26,46	24,69	36	3
T 15.1	4	9	1456	27,13	23,55	39	2,7
T 15.2	4	9	1425	27,56	23,30	32	2,2
T 15.3	4	9	1486	26,41	23,34	44	3
T 17.1	4	11	1664	27,02	23,44	35	2,1
T 17.2	4	11	1745	27,88	23,34	50	2,9
T 17.3	4	11	1804	26,37	22,34	73	4
T 19.1	6	5	1330	27,64	24,75	65	4,9
T 19.2	6	5	1429	26,41	25,45	59	4,1
T 19.3	6	5	1490	27,25	24,80	71	4,8
T 21.1	6	7	1751	27,62	24,10	42	2,4
T 21.2	6	7	1657	27,71	23,46	89	5,4
T 21.3	6	7	1822	26,59	23,68	102	5,6
T 23.1	6	9	2391	26,98	23,95	146	6,1
T 23.2	6	9	2056	27,39	23,59	273	13,3
T 23.3	6	9	2146	27,43	24,54	191	8,9
T 25.1	6	11	2539	27,82	22,46	95	3,7
T 25.2	6	11	2468	26,76	22,01	280	11,3
T 25.3	6	11	2623	27,14	22,05	255	9,7

APÊNDICE D – Dados gerais dos CPS ensaiados a compressão simples e analisados quanto a sucção (Amostras moldadas a massa de 1,453 g/cm³)

CP	CV (%)	Cal (%)	Qu	Umidade Moldagem	Umidade Rompimento	Sucção (kPa)	Sucção/Qu (%)
T 4.1	0	5	239	27,79	28,13	15	6,3
T 4.2	0	5	265	26,86	27,61	24	9,1
T 4.3	0	5	249	27,61	27,96	19	7,6
T 6.1	0	7	434	26,05	30,01	20	4,6
T 6.2	0	7	417	27,89	30,12	14	3,4
T 6.3	0	7	462	27,63	29,56	25	5,4
T 8.1	0	9	780	26,12	28,88	27	3,5
T 8.2	0	9	817	26,75	28,54	39	4,8
T 8.3	0	9	766	27,27	29,23	19	2,5
T 10.1	0	11	1098	27,32	28,52	35	3,2
T 10.2	0	11	1045	26,86	25,05	23	2,2
T 10.3	0	11	1067	26,77	25,25	28	2,6
T 12.1	4	5	725	27,19	24,52	31	4,3
T 12.2	4	5	674	27,72	24,47	29	4,3
T 12.3	4	5	610	26,49	24,47	45	7,4
T 14.1	4	7	866	27,57	24,77	50	5,8
T 14.2	4	7	907	27,19	24,88	57	6,3
T 14.3	4	7	1007	26,85	25,43	74	7,3
T 16.1	4	9	1215	27,03	23,67	76	6,3
T 16.2	4	9	1252	27,94	24,17	83	6,6
T 16.3	4	9	1187	26,88	23,38	97	8,2
T 18.1	4	11	1318	27,44	24,48	130	9,9
T 18.2	4	11	1251	26,97	24,50	117	9,4
T 18.3	4	11	1387	27,39	24,79	195	14,1
T 20.1	6	5	1022	27,83	24,20	110	10,8
T 20.2	6	5	865	27,68	24,88	78	9
T 20.3	6	5	991	27,35	24,13	96	9,7
T 22.1	6	7	1411	26,33	24,24	72	5,1
T 22.2	6	7	1232	27,49	24,09	77	6,2
T 22.3	6	7	1311	26,17	23,56	83	6,3
T 24.1	6	9	1584	26,51	22,80	213	13,4
T 24.2	6	9	1439	26,64	23,23	125	8,7
T 24.3	6	9	1640	27,25	23,01	140	8,5
T 26.1	6	11	2176	26,51	21,77	399	18,3
T 26.2	6	11	2061	27,58	22,85	284	13,8
T 26.3	6	11	1801	27,80	22,51	178	9,9